

Scientific Review – Engineering and Environmental Sciences (2017), 26 (2), 202–209  
Sci. Rev. Eng. Env. Sci. (2017), 26 (2)  
Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska (2017), 26 (2), 202–209  
Prz. Nauk. Inż. Kszt. Środ. (2017), 26 (2)  
<http://iks.pn.sggw.pl>  
DOI 10.22630/PNIKS.2017.26.2.18

**Sławomir BIRUK, Łukasz RZEPECKI**

Katedra Inżynierii Procesów Budowlanych, Politechnika Lubelska  
Department of Construction Methods and Management, Lublin University of Technology

## **Wpływ zjawiska uczenia się i zapominania na czas realizacji powtarzalnych procesów budowlanych realizowanych w warunkach losowych** **The impact of learning–forgetting phenomenon on duration of repetitive construction processes conducted in random conditions**

**Słowa kluczowe:** harmonogramowanie przedsięwzięć budowlanych, procesy powtarzalne, teoria uczenia się i zapominania, symulacja cyfrowa

**Key words:** construction project scheduling, repetitive processes, learning–forgetting theory, simulation method

### **Wprowadzenie**

Przedsięwzięcia budowlane często obejmują swym zakresem roboty wielokrotnie powtarzane na identycznych lub podobnych obiektach lub ich częściach, zwanych działkami roboczymi. Przykładem takich inwestycji są m.in. budowy wielokondygnacyjnych budynków mieszkalnych i użyteczności publicznej

(zazwyczaj wielosekcyjnych), obiektów liniowych: dróg, sieci instalacji zewnętrznych czy rurociągów, ale także realizacje przedsięwzięć złożonych z wielu obiektów o podobnej konstrukcji i technologii wykonania. Roboty powierzane są do wykonania jednostkom organizacyjnym (brygadam, zespołom roboczym, pojedynczym maszynom i zestawom maszyn) o odpowiednich kwalifikacjach, realizujących zadania na kolejnych działkach roboczych lub lokalizacjach.

Teoria uczenia się służy do matematycznego opisu zależności między liczbą powtórzeń pracy a wydajnością. W praktyce krzywa uczenia się używana jest w odniesieniu do poprawy wydajno-

\*Wyniki prac były finansowane ze środków statutowych przyznanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego (S/63/2017).

ści wynikającej zazwyczaj z doświadczenia, a nie teoretycznego zdobywania wiedzy. Założenie to sprawdza się w przypadku wykonywania jednorodnych operacji produkcyjnych, podczas których pracownik stale doskonali swoje umiejętności, ewentualnie dąży do zapewnienia większej ergonomii swojego stanowiska pracy (Łapuńska, Pisz i Marek-Kołodziej, 2015). Wzrost liczby powtarzanych operacji prowadzi do nabywania coraz większej praktyki, a co za tym idzie skrócenia czasu i zmniejszenia kosztu ich realizacji. Jednym z pierwszych opracowań dotyczących efektu uczenia się były obserwacje dokonane w fabryce samolotów Wright. Na ich podstawie stwierdzono, że podwojenie produkcji (montaż komponentów lotniczych) powoduje wzrost wydajności o 20%. Oznacza to, że stopa uczenia się wynosi 80% (Lam, Lee i Hu, 2001). Z powodu nieciągłości pracy brygad roboczych należy uwzględniać także efekt zapominania, który jest proporcjonalny do czasu trwania przerw (okresu, w którym brygada nie wykonuje robót tego samego rodzaju). Na etapie projektowania harmonogramu robót powinno brać się pod uwagę skrócenie czasu trwania procesów ze względu na efekt uczenia się i zdobyte doświadczenie na innych budowach. Dokładniejsze oszacowanie czasu realizacji przedsięwzięcia może zapewnić przewagę na etapie składania ofert w przetargach na roboty budowlane.

Wpływ doświadczenia na wydajność pracy był analizowany w budownictwie, np. przy realizacji stropów żelbetowych (Pellegrino, Costantino, Piettoforte i Sancilo, 2012), kryciu dachów (Mályusz i Pém, 2013), wykonywaniu pali

żelbetowych (Hinze i Olbina, 2009) czy przy robotach zbrojarskich (Jarkas, 2010). Najczęściej przyjmuje się, że stopa uczenia się dla większości procesów w budownictwie wynosi od 70 do 90%.

Jarkas (2010), analizując roboty zbrojarskie prowadzone w 20 budynkach, stwierdził, że nie zawsze można odnotować wzrost wydajności pracy poprzez jej powtarzanie. Sądzi on, że pracownicy przenoszą doświadczenie z innych placów budów, a na wydajność mają wpływ warunki na budowie, stres i stopień obciążenia pracą. Jarkas i Horner (2011), badając wydajność prac ciesielskich, zaobserwowali, że na 27 realizowanych obiektów tylko w jednym zaobserwowano stopę uczenia się na poziomie 95% (dla pozostałych powyżej 99%). Autorzy uważają, że brak efektu zdobywania doświadczenia może wynikać z wpływu czynników, takich jak: zmiana liczebności brygad roboczych, skrócenie bądź wydłużenie czasu trwania zmiany roboczej czy też brak motywacyjnego systemu wynagrodzeń. Badania te potwierdzają zmienność warunków pracy na budowie i trudność w bezpośredniej adaptacji metod i technik organizatorskich do budownictwa.

Lam i inni (2001) włączyli krzywe uczenia się i zapominania do wyznaczenia terminów rozpoczynania i zakończenia procesów budowlanych przedsięwzięć złożonych z procesów powtarzalnych i planowanych metodą *Line of Balance*. Lutz, Halpin i Wilson (1994) zastosowali model Wrighta do planowania symulacyjnego przedsięwzięć budowlanych. Założyli oni, że czasy trwania procesów budowlanych, ze względu na krzywą doświadczenia, mogą być skrócone maksymalnie o 25%.

Celem niniejszego artykułu jest określenie wpływu efektu uczenia się i zapominania na czas wykonania procesów budowlanych na przykładzie robót wykończeniowych realizowanych w wielokondygnacyjnym budynku mieszkalnym. Opracowano program symulacyjny do planowania procesów powtarzalnych realizowanych w warunkach losowych w celu określenia wpływu efektu uczenia się i zapominania na czas trwania przedsięwzięcia.

### Efekt uczenia się i zapominania

Podstawowym, najstarszym modelem uczenia się jest model wykładniczy Wrighta (1936):

$$T_n = T_1 \cdot n^{-l} \quad (1)$$

gdzie:

$T_n$  – czas wykonania procesu na  $n$ -tej działce roboczej,

$T_1$  – czas wykonywania procesu na pierwszej działce,

$n$  – liczba powtórzeń procesu dokonanych przed działką  $n$ ,

$l$  – wskaźnik krzywej uczenia się (doświadczenia).

Przyjmuje się, że  $l = -\frac{\log s}{\log 2}$ , a  $s$  nazywane jest stopą uczenia się.

Modyfikacją modelu Wrighta jest model Stanford-B, uwzględniający wcześniej zdobyte doświadczenie np. na innych placach budów (Carlson, 1973):

$$T_n = T_1 \cdot (n + B)^{-1} \quad (2)$$

gdzie:  $B$  – odpowiednik doświadczenia zdobytego przed rozpoczęciem prac.

Przerwy w pracy brygad roboczych powodują wydłużenie czasu trwania robót realizowanych na kolejnych dział-

kach roboczych. Przy krótkotrwałych przerwach występuje utrata części zdobytego doświadczenia, ale jeżeli przerwa jest odpowiednio długa, całe zdobyte doświadczenie zostanie utracone (Lam i inni, 2001).

Proces zapominania spowodowany przerwami w wykonywaniu pracy jest zjawiskiem odwrotnym do procesu zdobywania doświadczenia (Globerson, Levi i Shtub, 1989; Jaber i Bonney, 1996) i powoduje wydłużenie czasu wykonywania procesów na działkach (Carlson i Rowe, 1976):

$$\hat{T}_x = \hat{T}_1 \cdot x^f \quad (3)$$

gdzie:

$\hat{T}_x$  – czas wykonania procesów na  $x$ -tej działce roboczej po wystąpieniu przerwy (zgodnie z krzywą zapominania),

$\hat{T}_1$  – ekwiwalentny czas wykonania procesów na działce pierwszej wynikający z krzywej zapominania,

$x$  – liczba działek, na których wykonano by procesy, gdyby przerwa nie wystąpiła,

$f$  – pochylenie krzywej zapominania (współczynnik zapominania).

Według Elmaghraby'ego (1990) w modelu VRIF (ang. *Variable Regression Invariable Forgetting*) dla cyklu  $i + 1$  czas wykonania procesu  $\hat{T}_{1,i+1}$  na pierwszej działce po wystąpieniu przerwy w cyklu poprzednim  $i$  można obliczyć na podstawie:

$$\hat{T}_{1,i+1} = T_1 (u_{i+1} + 1)^{-l} \quad (4)$$

gdzie:

$u_{i+1}$  – ekwiwalentna liczba powtórzeń zapamiętana na początku cyklu  $i + 1$  po wystąpieniu przerwy w cyklu  $i$ :

$$u_{i+1} = \left( \frac{\widehat{T}_1}{T_1} (q_i + s_i)^f \right)^{-1/l} \quad (5)$$

gdzie:

$s_i$  – liczba działek, na których wykonano by procesy, gdyby przerwa nie wystąpiła.

Globerson i Levin (1987) zaproponowali następujące podejście pozwalające na włączenie efektu zapominania do krzywej uczenia się:

$$\widehat{T}_x = \widehat{T}_1 - [\widehat{T}_1 - F] \cdot (a \cdot t) \cdot e^{-a \cdot t} \quad (6)$$

gdzie:

$F$  – czas trwania kolejnego procesu, gdyby przerwa nie wystąpiła,

$a$  – współczynnik zapominania,

$t$  – czas trwania przerwy,

$e$  – podstawa logarytmu naturalnego.

### Przykład zastosowania teorii uczenia się i zapominania do planowania robót budowlanych w warunkach losowych

W przykładzie przeanalizowano wpływ efektu uczenia się i zapominania na czas wykonywania robót wykończeniowych w 15-kondygnacyjnym budynku mieszkalnym. Na każdej kondygnacji realizowanych jest kolejno pięć procesów budowlanych: murowanie ścianek działowych z bloczków z betonu komórkowego, tynkowanie, wykonanie podłóży pod posadzki, malowanie oraz ułożenie warstw posadzkowych. Założono, że ilość robót do wykonania na każdej kondygnacji jest jednakowa, a wydajność brygad roboczych jest uwarunkowana wydajnością maszyn (nie można

jej modyfikować w sposób ciągły), co skutkuje zróżnicowaniem czasów wykonania kolejnych procesów budowlanych na tej samej działce roboczej. Przyjęto, że procesy rozpoczynają się w terminach  $t_{ij}^r$  najwcześniejszych z możliwych (bezpośrednio po zakończeniu procesu wcześniejszego na tej działce oraz wykonaniu przez brygadę robót na działce poprzedzającej) zgodnie z zależnością:

$$t_{ij}^r = \max \begin{cases} t_{(i-1),j}^r + t_{(i-1),j} \\ t_{i,(j-1)}^r + t_{i,(j-1)} \end{cases} \quad (7)$$

gdzie:

$t_{ij}$  – czas pracy brygady  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, 5$ ) na działce  $j$  ( $j = 1, 2, \dots, 15$ ),

$t_{11}^r = 0$ .

Przyjęte założenia prowadzą do wystąpienia przerw w pracy brygad roboczych.

W modelu symulacyjnym zaimplementowano wykładniczy model uczenia Wrighta – wyrażenie (1) oraz model zapominania opracowany przez Globersona i Levina – wyrażenie (6). Przyjęto trójkątne rozkłady prawdopodobieństwa czasu trwania procesów budowlanych (tab. 1).

Założono, że wskaźnik uczenia się i współczynnik zapominania są takie same dla każdego procesu. Dodatkowo założono, że zmniejszeniu ze względu na efekt uzyskania doświadczenia i zwiększeniu z powodu zapominania ulegają oszacowania optymistyczne, pesymistyczne i najbardziej prawdopodobne. Do generowania wartości zmiennych losowych czasów trwania procesów budowlanych wykorzystano niezależne generatory liczb losowych z przedziału (0,1). Symulator został opracowany w języku

TABELA 1. Czasy trwania procesów budowlanych realizowanych na każdej kondygnacji  
 TABLE 1. Durations of construction processes conducted on each floor

Proces Process	Czas optymistyczny $t_a$ [dni] Optimistic time $t_a$ [days]	Czas najbardziej prawdopodobny $t_m$ [dni] Most possible time $t_m$ [days]	Czas pesymistyczny $t_b$ [dni] Pessimistic time $t_b$ [days]
Ścianki działowe Partition walls	5	6	8
Tynki Plasters	4	5	7
Podłóża Backings	8	10	15
Malowanie Painting	3	4	7
Posadzki Floors	5	8	11

symulacyjnym GPSS World firmy Minuteman Software. Badania symulacyjne przeprowadzono w dwóch etapach. W pierwszym przyjęto stopę uczenia się ( $s$ ) równą kolejno: 90, 92, 94, 96 oraz 100% (brak efektu uczenia). Wyniki przedstawione zostały w tabeli 2, a na rysunku 1 przedstawiono dystrybuanty czasu realizacji robót wykończeniowych ustalone na podstawie przeprowadzenia 10 000 przebiegów symulacyjnych.

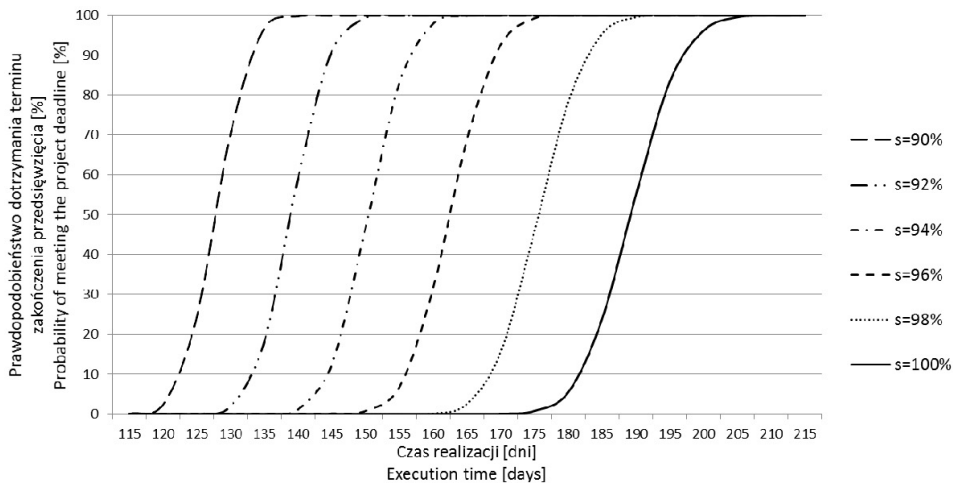
W drugim etapie badań symulacyjnych przyjęto stopę uczenia się  $s = 80\%$  oraz stopę zapominania  $a = 80\%$ . Wpływ

efektu uczenia się i zapominania na zmienną losową czasu trwania robót wykończeniowych w odniesieniu do przypadku, w którym pominięto wpływ efektu zdobywania doświadczenia i zapominania oraz do przypadku z uwzględnieniem jedynie uczenia się przedstawiono na rysunku 2.

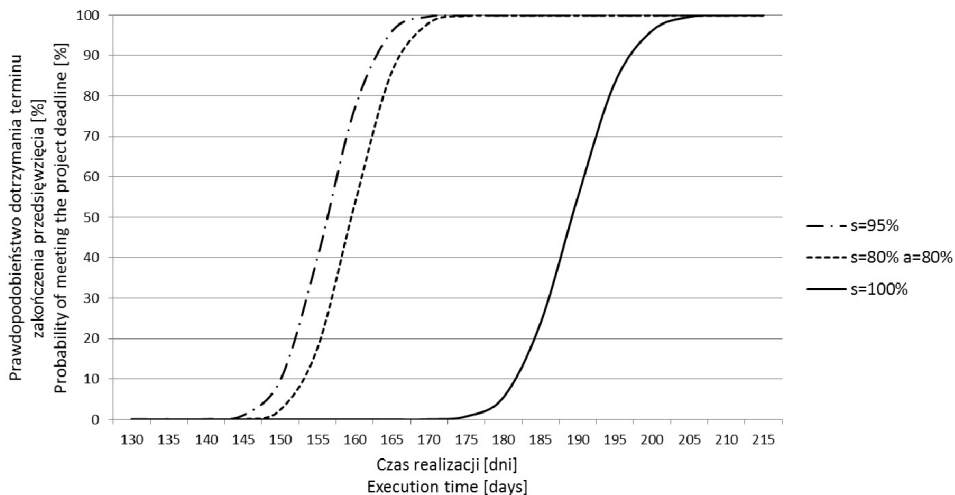
Przeprowadzone badania symulacyjne wykazują, że uwzględnienie efektu uczenia się może prowadzić do istotnego skrócenia planowanego terminu końcowego przedsięwzięcia, nawet w przypadku braku ciągłości pracy brygad roboczych i częściowej utraty zdobytego doświadczenia.

TABELA 2. Czas trwania przedsięwzięcia w zależności od stopy uczenia  
 TABLE 2. Project duration according to the learning rate

Wyszczególnienie Specification	Stopa uczenia się, $s$ [%] Learning rate, $s$ [%]					
	90	92	94	96	98	100 (brak efektu uczenia się) (no learning effect)
Średni czas realizacji przedsięwzięcia, $t$ [dni] Average project duration, $t$ [days]	127,84	139	150,44	162,5	175,61	189,36
Odchylenie standardowe Standard deviation	4,02	4,37	4,72	5,11	5,53	5,98



RYSUNEK 1. Dystrybuanty zmiennych losowych czasu trwania robót wykończeniowych dla wybranych stóp uczenia się  
 FIGURE 1. Distribution functions of random variables of the finishing works duration for selected learning rates



RYSUNEK 2. Wpływ efektu uczenia się i zapominania na prawdopodobieństwo dotrzymania terminu zakończenia przedsięwzięcia  
 FIGURE 2. The impact of learning–forgetting effect on probability of meeting the project deadline

## Podsumowanie i wnioski

Podczas projektowania harmonogramów budowlanych czasy trwania procesów są ustalane na podstawie norm pra-

cochłonności lub oszacowań ekspertów bez uwzględnienia doświadczenia zawodowego pracowników, przeniesionego z innych budów oraz efektu uczenia się. W trakcie realizacji przedsięwzięć zło-

zonych z procesów powtarzalnych, realizowanych na kolejnych działkach roboczych, następuje wzrost wydajności, a co za tym idzie skrócenie czasu i zmniejszenie kosztu realizacji przedsięwzięcia. W celu wykorzystania efektu uczenia się należy dążyć do eliminacji przerw w pracy brygad roboczych. Zagadnienie harmonizacji pracy brygad roboczych w warunkach losowych z uwzględnieniem efektu uczenia się i zapominania będzie kierunkiem dalszych badań autorów.

## Literatura

- Carlson, J.G. (1973). Cubic learning curves-precision tool for labor estimating. *Manufacturing Engineering & Management*, 71(5), 22-25.
- Carlson, J.G. i Rowe R.J. (1976). How much does forgetting cost? *Industrial Engineering*, 8(9), 40-47.
- Elmaghraby, S.E. (1990). Economic manufacturing quantities under conditions of learning and forgetting (EMQ/LaF). *Production Planning and Control*, 1(4), 196-208.
- Globerson, S. i Levin, N. (1987). Incorporating forgetting into learning curves. *International Journal of Operations & Production Management*, 7(4), 80-94.
- Globerson, S., Levi, N. i Shtub, A. (1989). Impact of breaks on forgetting when performing a repetitive task. *IIE Transactions (Institute of Industrial Engineers)*, 21(4), 376-381.
- Hinze, J. i Olbina, S. (2009). Empirical analysis of the learning curve principle in prestressed concrete piles. *Journal of Construction Engineering and Management*, 135(5), 425-31.
- Jaber, M.Y. i Bonney, M. (1996). Production breaks and the learning curve: the forgetting phenomenon. *Applied Mathematical Modelling*, 20(2), 162-169.
- Jarkas, A.M. (2010). Critical investigation into the applicability of the learning curve theory to rebar fixing labor productivity. *Journal of Construction Engineering and Management*, 136(12), 1279-1288.
- Jarkas, A.M. i Horner, M. (2011). Revisiting the applicability of learning curve theory to formwork labour productivity. *Construction Management and Economics*, 29, 483-493.
- Lam, K.C., Lee, D. i Hu, T. (2001). Understanding the effect of the learning-forgetting phenomenon to duration of projects construction. *International Journal of Project Management*, 19, 411-420.
- Lutz, J., Halpin, D. i Wilson, J. (1994). Simulation of learning development in repetitive construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, 120(4), 753-773.
- Łapuńka, I., Pisz, I. i Marek-Kołodziej, K. (2015). Pragmatyzm krzywych uczenia się i doświadczeń w aspekcie organizacji projektowych. *Przedsiębiorczość i Zarządzanie*, 16(5, część II), 29-41.
- Mályusz, M. i Pém, A. (2013). Prediction of the learning curve in roof insulation. *Automation in Construction*, 36, 191-195.
- Pellegrino, R., Costantino, N., Pietroforte, R. i Sancilio, S. (2012). Construction of multi-storey concrete structures in Italy: patterns of productivity and learning curves. *Construction Management and Economics*, 30(2), 103-115.
- Wright, T.P. (1936). Factors affecting the cost of airplanes. *Journal of the Aeronautical Sciences*, 3(4), 122-128.

## Streszczenie

**Wpływ zjawiska uczenia się i zapominania na czas realizacji powtarzalnych procesów budowlanych realizowanych w warunkach losowych.** Przedsięwzięcia budowlane często obejmują swym zakresem roboty wielokrotnie powtarzane na identycznych lub podobnych obiektach lub ich częściach, zwanych działkami roboczymi. Cykliczność procesów budowlanych umożliwia zastosowanie teorii uczenia się i zapominania do planowania realizacji przedsięwzięć budowlanych. W artykule przedstawiono przykład zastosowania teorii uczenia i zapominania w procesie planowania realizacji wielokondygnacyjnego budynku mieszkalnego w warunkach losowych.

## Summary

**The impact of learning–forgetting phenomenon on duration of repetitive construction processes conducted in random conditions.** Construction projects encompass repetitive works carried out on the same or similar object parts, called working units. Due to the cyclical nature of construction processes it is possible to use the learning–forgetting theory to construction projects scheduling. The article shows an example of using learning–forgetting theory in the planning of implementation multi-storey residential building in random conditions.

### Authors' address:

Sławomir Biruk, Łukasz Rzepecki  
Politechnika Lubelska  
Wydział Budownictwa i Architektury  
ul. Nadbystrzycka 40  
20-618 Lublin, Poland  
e-mail: s.biruk@pollub.pl  
l.rzepecki@pollub.pl