

Harmonogramowanie przedsięwzięć budowlanych z uwzględnieniem modelu czasowo-przestrzennego

Prof. Siergiej Bolotin z Państwowego Uniwersytetu Architektury i Budownictwa w Sankt Petersburgu i dr Aldyn Dadar z Tuwińskiego Uniwersytetu Państwowego, dr inż. Magdalena Rogalska, Politechnika Lubelska, dr hab. inż. Zdzisław Hejducki, Politechnika Wrocławska

1. Wprowadzenie

Celem pracy jest przedstawienie metodyki harmonogramowania przedsięwzięć budowlanych realizowanych w systemie potokowym, z zastosowaniem modelu czasowo-przestrzennego. Podstawowy problem dotyczy określenia terminu zakończenia przedsięwzięcia budowlanego z uwzględnieniem niepewności danych i wpływu czynników zakłócających proces realizacji. Do rozwiązania zadania naukowego zastosowano analogię modelu matematyczno-fizycznego.

W praktyce gospodarczej przekroczenie ustalonych terminów realizacji obiektów budowlanych powoduje znaczne straty (kary umowne lub niewykorzystane zasoby). Jest to dość powszechne zjawisko w praktyce budowlanej, co powoduje konieczność poszukiwania metod umożliwiających określanie przewidywanych terminów realizacji robót w warunkach rzeczywistych. Pojawia się więc potrzeba takiego modelowania przedsięwzięć budowlanych, aby możliwie dokładnie odwzorować przebieg rzeczywistych procesów budowlanych i oszacować terminy ich ukończenia, prace: [1, 4, 7]. Ze względu na stosowanie nowych technik i technologii, unikalność, warunki atmosferyczne i geologiczne, często nie ma możliwości jednoznacznego określenia wartości pewnych parametrów harmonogramów robót, a w szczególności dokładnego określenia cyklu budowy. W takich przypadkach mamy do czynienia z procesem podejmowania decyzji w warunkach niepewności. Niepewność danych przekłada się bezpośrednio na wielkość ryzyka. Ponadto, w trakcie realizacji procesu budowy może się okazać, że niektóre parametry różnią się od wstępnie przyjętych („typowych”), co przy braku stabilności rozwiązania prowadzi do zupełnie nieprzydatnych w praktyce rozwiązań. Niepowodzenia wynikające z bezpośredniego stosowania klasycznych algorytmów deterministycznych wskazują na konieczność uwzględnienia niepewności już na etapie budowy modelu obliczeniowego.

Prowadzi to do złożonych dyskretno-ciągłych problemów optymalizacyjnych z niepewnymi parametrami oraz nieregularnymi funkcjami celu. Przenosząc problemy harmonogramowania przedsięwzięć budowlanych w dziedzinę klasycznej teorii szeregowania zadań napotyka się wiele trudności związanych z doбором właściwego modelu oraz odpowiedniego algorytmu. Są to, zazwyczaj zupełnie nowe, *silnie NP-trudne* problemy optymalizacji kombinatorycznej [1,4], dla których dzisiaj nie są znane algorytmy optymalne o wielomianowej złożoności obliczeniowej. W praktyce stosuje się zazwyczaj szybkie algorytmy aproksymacyjne. W ostatnich latach popularne są konstrukcje bazujące na metodach sztucznej inteligencji.

Integralną częścią wielu systemów zarządzania jest planowanie przedsięwzięć budowlanych w systemach potokowych [4]. Jednym z wielu występujących tam ograniczeń są sprzężenia czasowe [1, 4] umożliwiające planowanie przebiegu robót w czasie i przestrzeni z zastosowaniem minimum cyklu realizacji jako funkcji celu. Dotyczą one realizacji kompleksu obiektów składających się z wielu jednakowych prac (na przykład: robót ziemnych, fundamentowych, konstrukcyjnych, dachowo-pokrywowych, montażu stolarki okiennej, elewacji, robót wykończeniowych, itp. wynikających z zakresu dokumentacji budowlanej, wykonywanych przez brygady robocze. Systemy potokowe w budownictwie są odpowiednikiem produkcji przepływowej (ang. *flow*) w przemyśle. Obiektom odpowiadają zadania, brygadam – maszyny, a pracom wykonywanym przez brygady – operacje. Kolejności wykonywania prac na obiekcie odpowiada porządek technologiczny.

2. System potokowy z niepewnymi czasami wykonywania prac

Problemy szeregowania zadań z niepewnymi parametrami rozwiązuje się stosując metody probabilistyki lub teorii zbiorów rozmytych. W pierwszym przypadku

istotna jest znajomość rozkładów zmiennych losowych. Niektóre procesy z natury mają charakter losowy [10]. Zależą od pogody, natężenia ruchu, liczby wypadków, warunków geologicznych, awarii sprzętu, itp. Jeżeli ponadto posiadają pewną „historię”, więc na bazie istniejących danych statystycznych można określić ich rozkłady [11, 12, 13].

Systemowi potokowemu realizacji prac budowlanych odpowiada problem przepływowy (ang. *flow shop*) w teorii szeregowania zadań.

Rozpatrujemy przedsięwzięcie budowlane polegające na wykonaniu n obiektów ze zbioru

$$O = \{O_1, O_2, \dots, O_n\}$$

przez m brygad ze zbioru

$$B = \{B_1, B_2, \dots, B_m\}$$

Każdy obiekt $O_i \in O$ jest ciągiem m prac

$$O_i = \{P_{i,1}, P_{i,2}, \dots, P_{i,m}\}$$

przy czym, praca $P_{i,j}$ ($i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m$) na i -tym obiekcie jest wykonywana przez brygadę B_j w czasie $p_{i,j}$. Prace na obiekcie $O_i \in O$ należy wykonać w zadany porządku technologicznym, tzn. dowolna praca $P_{i,j}$ ma być wykonywana po zakończeniu $P_{i,j-1}$, a przed rozpoczęciem $P_{i,j+1}$ ($2 \leq j \leq m-1$). Muszą być przy tym spełnione następujące ograniczenia:

- każda praca (na obiekcie) może być wykonywana tylko przez jedną, określoną przez ciąg technologiczny, brygadę,
- żadna brygada nie może wykonywać jednocześnie więcej niż jednej pracy,
- na każdym obiekcie musi być zachowany porządek technologiczny,
- wykonywanie żadnej pracy nie może być przerwane przed jej zakończeniem.

3. Sformułowanie problemu

Jednym z elementów systemu prognozowania, mających wpływ na ryzyko oraz niepewność realizacji cykli budowy jest zjawisko dotyczące wpływu przyszłych przewidywalnych, a głównie nieprzewidywalnych czynników losowych pojawiających się wraz z upływem czasu. Większość narzędzi obliczeniowych umożliwia prognozowanie na podstawie bazy danych statystycznych [5] (np. metod regresji, sieci neuronowych, ARIMA i innych), uzyskując dobre wyniki przez badanie skuteczności obliczeń za pomocą analizy wyników, np. obliczając błędy ME, MAE, MPE i MAPE [4]. Pomimo wielu podejść do problemu szacowania cykli realizacji przedsięwzięć budowlanych, można odnieść wrażenie o zjawisku niedoszacowania – wydłużeniu rzeczywistego terminu realizacji niż jego skróceniu. Pojawia się potrzeba poszukiwania nowych sposobów określania cykli budowy, np. z uwzględnieniem modelu czasoprzestrzeni. „Według dostępnych definicji czasoprzestrzeń

to zbiór dowolnych wydarzeń mających miejsce w dowolnym czasie pomiędzy dowolnymi obiektami. Samo słowo czasoprzestrzeń jest więc tworem opisującym jednym słowem szereg oddziałujących ze sobą (obiektów) w przestrzeni, co ma miejsce w czasie. Czasoprzestrzeń więc nie jest czymś materialnym, ale zbiorem obliczeń, jakie zachodzą pomiędzy punktami materialnymi w przestrzeni, w danym czasie. Wynika to z samej definicji słowa „czasoprzestrzeń” [http://www.racjonalista.pl/forum.php/s, 517368](http://www.racjonalista.pl/forum.php/s,517368). Przyjmując powyższe podejście do harmonogramowania przedsięwzięć budowlanych jako procesu planowania przebiegu robót w czasie i przestrzeni, można znaleźć analogię do zjawisk opisywanych w modelach matematyczno-fizycznych. Podstawą przyjętego podejścia do szacowania ryzyka realizacji zadania inwestycyjnego mogą być takie pojęcia jak: horyzont czasu oraz przestrzenna perspektywa. Pojęcia te wykorzystywane są w różnych obszarach, np. ekonomii, geometrii, fizyce, mają one wiele znaczeń. Horyzont czasowy, w zagadnieniach ekonomicznych, może dotyczyć nie tylko przedziału czasu, w którym prowadzi się przedsięwzięcie inwestycyjne, ale również okresu, w którym można korzystać z zakontraktowanych środków realizacji [14, 16, 17]. Ponadto, przestrzenna perspektywa jako pojęcie stosowane jest np. w sztuce malarskiej jako sposób odwzorowania rzeczywistości, gdzie jak wiemy z doświadczenia, przedmioty bliższe są pozornie większe i zasłaniają położone dalej przedmioty. Na przykład równoległe linie – krawędzie budynków, krawężniki uliczne – pozornie zbiegają się w nieskończenie odległych punktach, położonych w poziomie.

4. Analogia modelu czasowo przestrzennego i efektywności przedsięwzięć inwestycyjnych

Badania wielu naukowców dowodzą, że istnieją związki pomiędzy różnymi zjawiskami, które wydają się nie mieć ze sobą żadnych zależności, a jednak pojawiają się analogie. Przykładem może być np. znana hipoteza Riemanna (istnieją przypuszczenia, że zera funkcji ζ mogą być wartościami energii jakiegoś nieznanego układu kwantowego). Wiąże się np. teorie liczb, tj. problemy matematyczne ze zjawiskami fizycznymi. Przyjmując założenia o możliwych analogiach dla modeli zjawisk z różnych obszarów wiedzy, można posłużyć się analogią modelu czasowo przestrzennego przedsięwzięć budowlanych i efektywności przedsięwzięć inwestycyjnych. Mieszczą się one w obszarze zagadnień badań operacyjnych, a w szczególności harmonogramowania przedsięwzięć budowlanych.

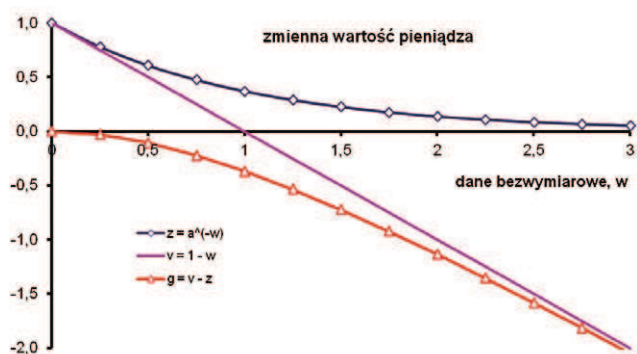
Można pokazać, że proponowany model czasowo przestrzenny ma ukrytą analogię z modelem obliczeniowym efektywności przedsięwzięć inwestycyjnych [2, 3, 6, 15]. W celu określenia najkorzystniejszego przedsięwzięcia inwestycyjnego można posłużyć się wartością bieżącą przyszłych wyników finansowych PV (present value)

$$PV = \sum_{t=1}^H \frac{CF_t}{(1+k)^t} \quad (1)$$

Gdzie:
 PV – (*present value*), czyli wartość obecna pieniądza,
 CF_t – (*future value*) nominalna wartość przyszłego przepływu pieniężnego w czasie t,
 H – horyzont czasowy prognozowanego przychodu,
 k – cena kredytu (*cost of capital*), nominalna stopa procentowa lub wskaźnik dyskonta.

Schemat obliczeniowy:

a	1	t=1/Ln(a) 2,972												
													lata	
t	0	0,25	0,5	0,75	1	1,25	1,5	1,75	2	2,25	2,5	2,75	3	
z	1	0,779	0,607	0,472	0,368	0,287	0,223	0,174	0,135	0,105	0,082	0,064	0,05	
v=1-t·Ln(a)	1	0,75	0,5	0,25	0	-0,25	-0,5	-0,75	-1	-1,25	-1,5	-1,75	-2	
g=v-z	0	-0,029	-0,107	-0,222	-0,368	-0,537	-0,723	-0,924	-1,135	-1,355	-1,582	-1,814	-2,05	



Rys. 1. Zależność wartości pieniądza w czasie

Rysunek 1 ilustruje zjawiska mające miejsce w procesie realizacji inwestycji, które dotyczą wartości pieniądza w czasie realizacji i eksploatacji obiektów budowlanych. Dostrzec można zależność pomiędzy spadającą wartością pieniądza wraz z upływem czasu oraz rosnącą wartością wskaźnika dyskontowego. Poniżej podano zależności formalne wyrażające omawiane zjawiska [13, 17].

Przyjmując zmienność wartości pieniądza w czasie, zależność (2) zaznaczono na rysunku 1.

$$z_t = \alpha^{-t} \quad (2)$$

gdzie: $\alpha = (1+k)$.

Poniżej przedstawiono zależności współczynnika dyskonta i stycznej:

$$v = dz/dt = 1 - t/\tau \quad (3)$$

$$\tau = 1/Ln(\alpha)$$

Przyjmując bezwymiarową wartość czasu w:

$$w = t/\tau$$

zależności współczynnika dyskonta i stycznej będą następujące:

$$z = \alpha^{-w} \quad (4)$$

$$v = 1 - w \quad (5)$$

Zależność: $g = v - z$, modeluje krzywą wyznaczoną z różnicy $g = v - z$. Może być interpretowana i wyznaczana jako odległość do stycznej równa współczynnikowi dyskonta.

Przedstawione zależności mogą być interpretowane jako przestrzenno finansowa analogia, którą można odnieść do krzywej modelu czasowo przestrzennego, odpowiednika szacowania terminów realizacji robót budowlanych.

Ponadto ekonomiści [8, 9, 18, 19] przyjmują jako horyzont czasowy H prognozowanego przychodu:

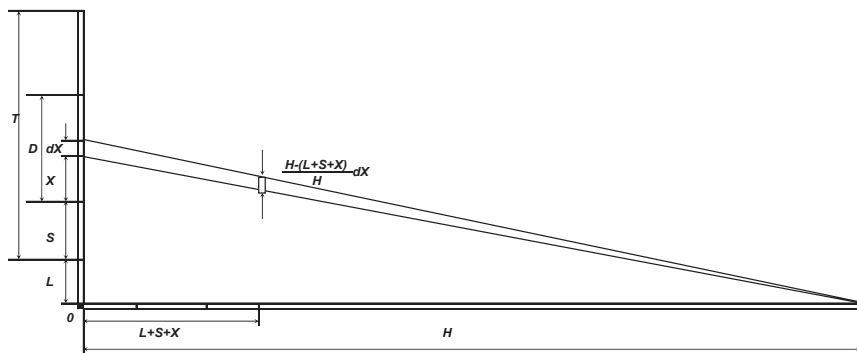
$$H = 3 / Ln(1+k) \quad (6)$$

5. Model czasowo przestrzenny w harmonogramowaniu robót budowlanych

Przedstawione powyżej założenia i próby znalezienia analogii do zjawisk występujących w praktyce harmonogramowania robót budowlanych pozwalają na próbę zastosowania modelu czasowo przestrzennego [14, 17]. Rysunek 2 przedstawia geometryczną interpretację szacowania czasów realizacji i eksploatacji przedsięwzięć budowlanych z uwzględnieniem istotnych parametrów obliczeniowych. Należą do nich wielkości parametryczne przedstawione na rysunku 2.

Jedną z podstawowych wielkości jest H – horyzont czasowy określający moment, kiedy koszty realizacji przedsięwzięć budowlanych zamieniają się w dochody wynikające z eksploatacji budowli. Głównym parametrem jest planowany T i rzeczywisty czas realizacji przedsięwzięcia, które to wartości mogą być różne. Jako L przyjmuje się przedział czasu obejmujący początek i koniec fazy przygotowania i projektowania przedsięwzięcia. Symbole S i D oznaczają początek i czas trwania dowolnej roboty budowlanej stanowiącej składnik struktury podziału prac (WBS).

Poniżej przedstawiono linowy schemat zależności horyzontu czasowego przedsięwzięcia budowlanego od momentu początkowego przystąpienia do realizacji inwestycji, przyjmując wielkości elementarne. Można dostrzec na przedstawionym schemacie, że czas wraz z jego upływem, zmniejsza się. Elementarny czas realizacji dx można wyznaczyć z zależności przedstawionej poniżej.



Rys. 2. Schemat liniowej zależności horyzontu czasowego przedsięwzięcia budowlanego od momentu początkowego

$$d = D \int_{L+S}^{L+S+D} \frac{H-L-S-X}{H} dX = D \left[1 - \frac{2L+2S+0.5D}{H} \right] \quad (7)$$

W celu wyrównania odchylenia od zaniżonych terminów realizacji przedsięwzięć budowlanych wynikających z nieprzewidywanych na początku realizacji, losowych zdarzeń można zastosować współczynnik korygujący k_i .

$$k_i = \frac{H}{H - 2L - 2S_i - 0.5D_i} \quad (8)$$

Adaptując model czasowo przestrzenny do zjawisk związanych z harmonogramowaniem przedsięwzięć budowlanych można przyjąć zakrzywienie osi czasu zgodnie klasycznym podejściem. Promień R można wyznaczyć z zależności:

$$R = \frac{H^2 - (L+T)^2}{2(L+T)} \quad (9)$$

6. Studium przypadku

Poniżej przedstawiono przykład obliczeniowy zawierający dane dotyczące realizacji czterech budynków mieszkalnych. Opracowano uogólnione harmonogramy realizacyjne na bazie danych normatywnych. Zastosowano metodę potokowej organizacji, a w szczególności metodę sprzężeń czasowych (TCM 3), [4],

uwzględniając sprzężenia między środkami realizacji i frontami roboczymi, tj. z drogą krytyczną. Wyniki obliczeń i założenia przedstawiono w tabeli 1.

Oznaczenia w tabeli:

- w górnym wierszu tabeli przedstawiono dane normatywne, dotyczące metod potokowych, w szczególności TCM3, [4],
 - w dolnej części tabeli przedstawiono wyniki obliczeń, wg proponowanej metodologii,
- dla t^{pes} , tj. najpóźniejszych terminów:

$$t^{pes} = \frac{D \cdot H}{H - L - S - D/2} \quad (10)$$

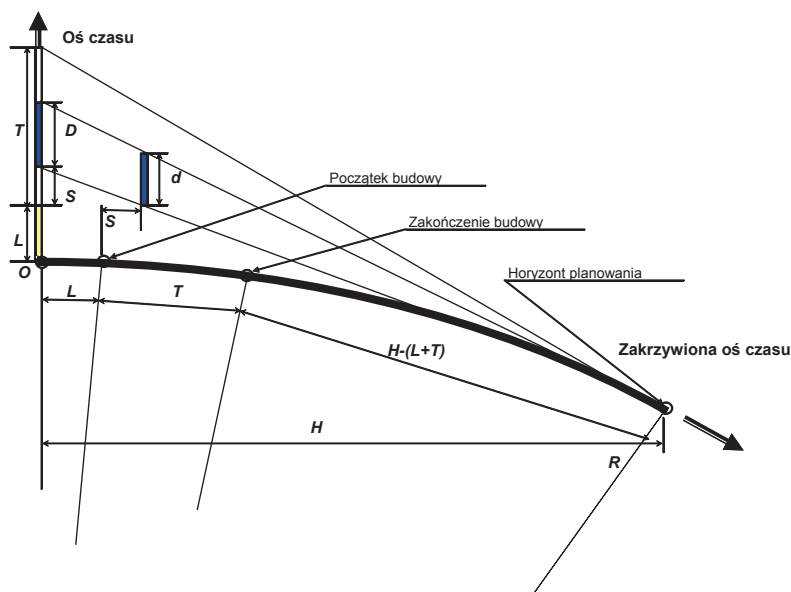
Oznaczenia:

- H – horyzont planowania, H=20 miesięcy,
- L – przedział czasowy od początku działań do początku budowy obiektu, L=4 miesiące
- D – czas trwania robót, S – początek roboty.

Tabela 1. Wyniki obliczeń

Lp	Liczba kondygnacji	Powierzchnia użytkowa [m ²]	Roboty przygotowawcze			Cykl zerowy		
			Początek	Czas trwania	Koniec	Początek	Czas trwania	Koniec
1	20	8000	0	1	1	1	3	4
			0	1,02	1,02	1,023	3,10	4,12
2	16	18000	1	1	2	4	3	7
			1,02	1,03	2,05	4,12	3,15	7,27
3	16	6000	2	1	3	7	2	9
			2,05	1,03	3,08	7,27	2,13	9,40
4	25	18000	3	1	4	9	3	12
			3,08	1,04	4,12	9,40	3,23	12,64

Lp	Liczba kondygnacji	Powierzchnia użytkowa [m ²]	Konstrukcja budynku			Roboty wykończeniowe		
			Początek	Czas trwania	Koniec	Początek	Czas trwania	Koniec
1	20	8000	4	7	11	11	3	14
			4,12	7,43	11,55	11,551	3,27	14,82
2	16	18000	11	9	20	20	3	23
			11,55	9,97	21,52	21,523	3,44	24,96
3	16	6000	20	6	26	26	3	29
			21,52	6,94	28,46	28,46	3,56	32,02
4	25	18000	26	13	39	39	3	42
			28,46	15,90	44,36	44,362	3,86	48,22



Rys. 3. Schemat z uwzględnieniem zakrzywionej osi czasu

W wyniku przeprowadzonych obliczeń zauważyć można różnice w uzyskanych rezultatach, pomiędzy danymi normatywnymi wyznaczonymi na podstawie KNR (Katalogów Nakładów Rzeczowych) a obliczeniami przeprowadzonymi według prezentowanej metodyki. Dla końcowego etapu realizacji, przypuszczalne wydłużenie cyklu realizacji obiektów może stanowić: 5,85%, 8,52%, 10,4%, 14,80% planowanego normatywnego cyklu wykonania zadania inwestycyjnego. W celu uzyskania większej liczby danych i próby znalezienia zależności oraz reguł, planuje się przeprowadzenie w przyszłości obliczeń numerycznych na większą skalę.

7. Podsumowanie

Prezentowane obliczenia pokazują różnice pomiędzy cyklami robót wyznaczonymi na podstawie danych normatywnych oraz obliczonych na podstawie przedstawionej metodologii. Przyjęto wartości pesymistyczne, które bardziej – jak to wynika z praktyki – odpowiadają rzeczywistości. Przeprowadzone obliczenia nie zostały dotychczas zweryfikowane w praktyce, jednakże pokazują sposób oszacowania planowanych terminów realizacji przedsięwzięć budowlanych z zastosowaniem modelu czasowo-przestrzennego. Jest to propozycja jednego z wielu podejść do zagadnienia harmonogramowania, umożliwiających uzasadnione formalnie szacowanie czasu realizacji przedsięwzięć budowlanych.

Artykuł ten powstał w wyniku współpracy naukowej w ramach Międzynarodowej Szkoły Metod Sprzężeń Czasowych, z udziałem pracowników Katedry Organizacji Budownictwa, Sankt Petersburg State Civil and Architectural University.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Bożejko Wojciech, Hejducki Zdzisław, Rogalska Magdalena, Wodecki Mieczysław, Scheduling of construction projects with a hybrid evolutionary algorithm's application. W: Evolutionary algorithms/ed. by Eisuke Kita. Rijeka: InTech, cop. 2011. s. 295–308, 6 rys., 1 tab., bibliogr. 18 poz.
- [2] Cheng F. Lee, Joseph E. Finnerty, Corporate finance: theory, method and applications. Harcourt Brace Jovanovich, Publisher, San Diego, New York, Chicago, Austin, Washington, 2000 – XVIII, 686 p
- [3] Coplend Tom, Koller Tim, Murrin Jack, Valuation measuring and managing the value of companies. McKinsey & Company, Inc. New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore, 2000. – 576 p
- [4] Hejducki Zdzisław, Rogalska Magdalena, Time coupling methods: construction scheduling and time/cost optimization, Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2011. 100 s., 42 rys., 8 tab. Bibliogr. 51 poz.
- [5] <http://hr-portal.ru/statistica/gl13/gl13.php>
- [5] Louzolo-Kimbembe, P., Mbani, E., 2013. New approach of delay penalties formulation: Application to the case construction projects in the Republic of Congo. Journal of Civil Engineering and Construction Technology, 4 (1): 6–22
- [7] Rogalska M., Bożejko W., Hejducki Z., (2008). Time/cost optimization using hybrid evolutionary algorithm in construction project scheduling, Automation in Construction 18, 24–31
- [8] Sadi, A., Sadiq, A., 2006. Causes of delay in large construction projects. Journal Project Management, 24 (4): 349–357
- [9] Аношкина Е.Л., Карпович Ю.В., Методические аспекты перспективного планирования развития сельских территорий. Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Социально-экономические науки. 2010. № 7. С. 78–86
- [10] Баркалов С.А., Голенко-Гинзбург Д.И., Набиуллин И.Ф., Сидоренко Е.А., Решение задач перспективного планирования и прогнозирования при случайных оценках продолжительности операций. Вестник Воронежского государственного технического университета. 2010. т. 6. № 3. с. 38–42
- [11] Болотин С.А., Дадар А.Х., Определение погрешности калиметрической оценки весов аддитивных показателей качества календарных планов строительства//Изв. вуз. Строительство, # 2, 2010. СС. 29–33
- [12] Болотин С.А., Дадар А.Х., Птухина И.С., Совершенствование метода PERT в статистическом моделировании календарных планов//Вестник гражданских инженеров, СПб.: СПбГАСУ, #2 (31), 2012. сс.132–137
- [13] Гусев Е.В., Овчинникова М.С., Сбалансированное календарное планирование и организационно-технологическое моделирование в строительстве: теория и практика. Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2012. № 14 (276). С. 59–63
- [14] Кудряшова Е.В., Понятие «горизонт планирования» в финансовом праве. Финансовое право. 2013, №4. СС. 5–8
- [15] Куклюгина Л.А., Куклюгин А.В., Харисов А.Р., Исследование существующих методов определения продолжительности строительства промышленных объектов. Известия КАГАСУ, 2012, №1 (19). СС. 134–139
- [16] Кулешов Д.А., Стрельников Г.Е., Инженерная геодезия для строителей: Учебник для вузов. –М.: Недра, 1990. – 256 с.: ил.
- [17] Харин А.А., Принцип неопределенного будущего, примеры его применения в экономической теории, возможности его применения в теориях сложных систем, в теории множеств, теории вероятностей и логике. Моделирование и Анализ Безопасности и Риска в Сложных Системах: Труды Международной Научной Школы МАБР, 2007
- [18] Шамина Л.К., Петров Д.Н., Динамика риска ошибочного выбора инновационного проекта//Альманах современной науки и образования. Тамбов, №9 (28), 2009
- [19] Шестакова И.Г., Анализ современных тенденций научно-технического прогресса и горизонты планирования. Экономика и экологический менеджмент. 2013, №1. СС. 67–82