

# Spis treści

|                                                                 |           |
|-----------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Przedmowa</b> . . . . .                                      | <b>11</b> |
| <b>1. Wprowadzenie</b> . . . . .                                | <b>15</b> |
| 1.1. Wstęp . . . . .                                            | 15        |
| 1.2. Ograniczenia tradycyjnego budownictwa . . . . .            | 16        |
| 1.3. Cyfryzacja branży budowlanej . . . . .                     | 21        |
| 1.4. Rola BIM w cyfryzacji budownictwa . . . . .                | 23        |
| 1.5. Odniesienia do strategii rozwoju Przemysł 4.0 . . . . .    | 25        |
| 1.6. Modele informatyczne i cyfrowe bliźniaki . . . . .         | 30        |
| 1.7. BIM w infrastrukturze w innych krajach . . . . .           | 32        |
| 1.8. Inspiracje i zakres monografii . . . . .                   | 35        |
| <b>2. Zarządzanie cyklem życia mostu</b> . . . . .              | <b>41</b> |
| 2.1. Filozofia zrównoważonego rozwoju . . . . .                 | 41        |
| 2.2. Zintegrowana analiza cyklu życia obiektów . . . . .        | 44        |
| 2.2.1. Składowe analizy zintegrowanej . . . . .                 | 44        |
| 2.2.2. Analiza ekonomiczna, LCC . . . . .                       | 46        |
| 2.2.3. Analiza środowiskowa, LCA . . . . .                      | 51        |
| 2.2.4. Analiza społeczna, S-LCA . . . . .                       | 53        |
| 2.2.5. Integracja analiz cyklu życia . . . . .                  | 54        |
| 2.3. Analiza kosztów cyklu życia obiektów mostowych . . . . .   | 56        |
| 2.3.1. Cykle życia obiektu mostowego . . . . .                  | 56        |
| 2.3.2. Ogólne założenia metodyki LCC . . . . .                  | 62        |
| 2.3.3. Modele degradacji mostu i okres analizy . . . . .        | 64        |
| 2.3.4. Wskaźnikowa ocena efektywności ekonomicznej . . . . .    | 66        |
| 2.3.5. Koszty jednostkowe przedsięwzięć mostowych . . . . .     | 68        |
| 2.3.6. Podejście deterministyczne i probabilistyczne . . . . .  | 70        |
| 2.4. Analiza środowiskowa obiektów mostowych, LCA . . . . .     | 72        |
| 2.5. Przykłady analizy cyklu życia obiektów mostowych . . . . . | 74        |

|                                                                                     |            |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 2.5.1. Oprogramowanie wspomagające analizy cyklu życia obiektów mostowych . . . . . | 74         |
| 2.5.2. Analiza zintegrowana w ocenie wariantów rozwiązań projektowych . . .         | 75         |
| 2.5.3. Analiza wielu obiektów . . . . .                                             | 82         |
| 2.6. Modele BIM w zarządzaniu cyklem życia . . . . .                                | 97         |
| <b>3. Metodyka BIM i zagadnienia pokrewne . . . . .</b>                             | <b>103</b> |
| 3.1. Ewolucja technik CAD w kierunku BIM . . . . .                                  | 103        |
| 3.2. Wprowadzenie do metodyki BIM . . . . .                                         | 106        |
| 3.2.1. Definicje BIM . . . . .                                                      | 106        |
| 3.2.2. Poziomy dojrzałości BIM . . . . .                                            | 111        |
| 3.2.3. Wielowymiarowość BIM . . . . .                                               | 113        |
| 3.2.4. Poziomy szczegółowości modelu BIM . . . . .                                  | 115        |
| 3.3. Standardy i platformy wymiany danych BIM . . . . .                             | 119        |
| 3.3.1. Interoperacyjność narzędzi BIM . . . . .                                     | 119        |
| 3.3.2. Koncepcja otwartych standardów BIM . . . . .                                 | 120        |
| 3.3.2.1. Standaryzacja związana z BIM . . . . .                                     | 120        |
| 3.3.2.2. Dane – Industry Foundation Classes, IFC . . . . .                          | 122        |
| 3.3.2.3. Procesy – <i>Information Delivery Manual</i> , IDM . . . . .               | 128        |
| 3.3.2.4. Nazwy – <i>Information Framework Dictionary</i> , IFD . . . . .            | 129        |
| 3.3.3. Procesy informacyjne i zarządcze BIM . . . . .                               | 130        |
| 3.3.3.1. Kluczowe dokumenty kontraktowe BIM . . . . .                               | 130        |
| 3.3.3.2. Wymagania informacyjne . . . . .                                           | 132        |
| 3.3.3.3. Plany wykonania oraz dostarczania informacji . . . . .                     | 135        |
| 3.3.3.4. Role osób w metodyce BIM . . . . .                                         | 136        |
| 3.3.4. Arkusze danych niegraficznych typu COBie . . . . .                           | 138        |
| 3.3.5. Platforma wymiany danych, CDE . . . . .                                      | 139        |
| 3.3.6. Klasyfikacja budowlana zgodna z BIM . . . . .                                | 143        |
| 3.4. Zagadnienia i technologie powiązane z BIM . . . . .                            | 146        |
| 3.4.1. Szczupłe budownictwo ( <i>Lean Construction</i> ) . . . . .                  | 146        |
| 3.4.2. Zintegrowany proces inwestycyjny, IPD . . . . .                              | 148        |
| 3.4.3. Rzeczywistość wirtualna, poszerzona i mieszana, VR, AR i MR . . . . .        | 151        |
| 3.4.4. Graficzne języki programowania, VPL . . . . .                                | 156        |
| 3.4.5. Projektowanie obliczeniowe i generatywne . . . . .                           | 161        |
| 3.4.6. Sztuczna inteligencja, AI . . . . .                                          | 167        |
| 3.4.7. Monitoring stanu technicznego, SHM . . . . .                                 | 172        |
| 3.4.8. Cyfrowe bliźniaki ( <i>Digital Twins</i> ) . . . . .                         | 175        |
| 3.4.9. Systemy informacji o terenie, GIS . . . . .                                  | 180        |
| 3.4.10. Rekonstrukcja 3D i pojazdy UAV . . . . .                                    | 186        |
| 3.4.11. Automatyzacja i robotyzacja . . . . .                                       | 192        |
| 3.4.11.1. Mechanizacja robót budowlanych . . . . .                                  | 192        |
| 3.4.11.2. Automatyzacja i roboty na budowie . . . . .                               | 194        |
| 3.4.11.3. Automatyzacja poza placem budowy . . . . .                                | 197        |
| 3.4.11.4. Techniki druku 3D . . . . .                                               | 199        |
| 3.4.12. Zarządzanie zasobami ( <i>Asset Management</i> ) . . . . .                  | 202        |
| 3.5. Korzyści z użycia metodyki BIM . . . . .                                       | 210        |

|                                                                                    |            |
|------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.5.1. Poprawa dostępu i usprawnienie zarządzania informacjami . . . . .           | 210        |
| 3.5.2. Zalety metodyki BIM w pracy zespołowej . . . . .                            | 212        |
| 3.5.3. Korzyści powiązane z cyklem życia mostu . . . . .                           | 214        |
| 3.5.4. Etap planowania i projektowania . . . . .                                   | 216        |
| 3.5.5. Etap prac budowlanych . . . . .                                             | 217        |
| 3.5.6. Etap użytkowania i utrzymania . . . . .                                     | 218        |
| 3.5.7. Korzyści pośrednie – innowacje, procesy, ludzie . . . . .                   | 219        |
| <b>4. Mosty jako element infrastruktury liniowej . . . . .</b>                     | <b>221</b> |
| 4.1. Metodyka BIM w budowlach kubaturowych i liniowych . . . . .                   | 221        |
| 4.2. Klasyfikacja mostów w kontekście BIM . . . . .                                | 225        |
| 4.3. Opis strukturalny mostu . . . . .                                             | 228        |
| 4.3.1. Zasadnicze elementy składowe mostu . . . . .                                | 228        |
| 4.3.2. Hierarchiczna struktura danych w opisie mostu . . . . .                     | 232        |
| 4.3.3. Istniejące standardy opisu mostów . . . . .                                 | 235        |
| 4.3.4. Propozycja hierarchicznej struktury danych opisujących most . . . . .       | 238        |
| 4.4. Biblioteka elementów mostowych w formie parametrycznych modeli 3D . . . . .   | 242        |
| 4.5. Technologie budowy mostów . . . . .                                           | 247        |
| 4.5.1. Ewolucja metod budowy mostów . . . . .                                      | 247        |
| 4.5.2. Prefabrykacja dźwigarów . . . . .                                           | 248        |
| 4.5.3. Nasuwanie podłużne . . . . .                                                | 248        |
| 4.5.4. Metody nawisowe (wspornikowe) . . . . .                                     | 251        |
| 4.5.5. Metody budowy całych przęseł (przęsło po przęśle) . . . . .                 | 254        |
| 4.5.6. Mosty rozporowe z dźwigarami łukowymi i ramowymi . . . . .                  | 255        |
| 4.6. Wymagania dotyczące modelu BIM obiektu inżynierskiego . . . . .               | 256        |
| 4.6.1. Proces modelowania i odpowiedzialność za model . . . . .                    | 256        |
| 4.6.2. Zawartość modelu i dane projektu . . . . .                                  | 257        |
| 4.6.3. Poziom szczegółowości, LOD . . . . .                                        | 259        |
| 4.6.4. Standaryzacja nazewnictwa plików . . . . .                                  | 263        |
| <b>5. BIM w planowaniu i projektowaniu mostów . . . . .</b>                        | <b>265</b> |
| 5.1. Podejście obiektowe w projektowaniu mostów . . . . .                          | 265        |
| 5.2. Praca zespołowa przy modelowaniu mostów . . . . .                             | 268        |
| 5.3. Planowanie wstępne i modele koncepcyjne . . . . .                             | 274        |
| 5.4. Narzędzia do tworzenia i analizy modeli mostów . . . . .                      | 279        |
| 5.5. Modelowanie geometrii mostów BIM 3D . . . . .                                 | 291        |
| 5.5.1. Powiązanie geometrii mostu i drogi w projektach koncepcyjnych . . . . .     | 291        |
| 5.5.2. Modelowanie podpór mostowych . . . . .                                      | 295        |
| 5.5.3. Parametryzacja wybranych elementów ustroju nośnego . . . . .                | 303        |
| 5.5.4. Generowanie dokumentacji 2D . . . . .                                       | 312        |
| 5.6. Przykłady mostowych modeli BIM 3D . . . . .                                   | 315        |
| 5.6.1. Obiekty drogowe o przekroju skrzynkowym z betonu sprężonego . . . . .       | 315        |
| 5.6.2. Dwuprzęsłowe wiadukty drogowe z betonu sprężonego . . . . .                 | 320        |
| 5.6.3. Przebudowa i wymiana obiektów mostowych . . . . .                           | 320        |
| 5.6.4. Naprawa uszkodzonego przez pojazd stalowego wiaduktu dla pieszych . . . . . | 325        |
| 5.6.5. Obiekty kolejowe ze stalowymi przęsłami . . . . .                           | 330        |

|                                                                         |            |
|-------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>6. BIM na budowie mostów</b>                                         | <b>332</b> |
| 6.1. Wprowadzenie                                                       | 332        |
| 6.2. Harmonogramy BIM 4D                                                | 334        |
| 6.2.1. Ograniczenia tradycyjnego podejścia do harmonogramów             | 334        |
| 6.2.2. Zalety metodyki BIM w planowaniu robót                           | 336        |
| 6.3. Przedmiary i kosztorysy BIM 5D                                     | 340        |
| 6.3.1. Tradycyjne sposoby tworzenia przedmiarów i kosztorysów           | 340        |
| 6.3.2. Korzyści z wykorzystania modelu BIM                              | 341        |
| 6.4. Cyfryzacja procesów budowy mostów                                  | 344        |
| 6.4.1. Urządzenia cyber-fizyczne na budowie                             | 344        |
| 6.4.2. Wirtualne projektowanie i budowa, VDC                            | 346        |
| 6.4.3. Koncepcja cyfrowej budowy infrastrukturalnej                     | 352        |
| 6.4.4. Uwzględnienie technologii budowy mostów                          | 353        |
| 6.5. Odbiór robót budowlanych i modele powykonawcze                     | 358        |
| 6.5.1. Aktualne podejście do odbioru robót i dokumentacji powykonawczej | 358        |
| 6.5.2. Modele powykonawcze związane z procesami BIM                     | 361        |
| <b>7. Modele BIM w użytkowaniu infrastruktury mostowej</b>              | <b>364</b> |
| 7.1. Wprowadzenie                                                       | 364        |
| 7.2. Konieczność poprawy bezpieczeństwa obiektów i jakości inspekcji    | 367        |
| 7.3. Systemy gospodarowania mostami, SGM                                | 370        |
| 7.3.1. Ewolucja narzędzi komputerowego wspomagania systemów SGM         | 370        |
| 7.3.2. Model BIM jako graficzna baza wiedzy o obiekcie                  | 375        |
| 7.3.3. Przejrzysty proces zarządzania obiektem                          | 378        |
| 7.4. Modelowanie uszkodzeń mostów                                       | 382        |
| 7.4.1. Stosowane metody opisu uszkodzeń mostów                          | 382        |
| 7.4.2. Koncepcja hierarchicznej klasyfikacji uszkodzeń                  | 389        |
| 7.4.3. Propozycja sposobu modelowania uszkodzeń w środowisku BIM        | 392        |
| 7.4.4. Poziomy szczegółowości modelu uszkodzenia klasy BIM              | 393        |
| 7.5. Ocena stanu technicznego mostów                                    | 400        |
| 7.5.1. Rola diagnostyki mostów w systemach SGM                          | 400        |
| 7.5.2. Aktualne praktyki w inspekcji stanu technicznego mostów          | 404        |
| 7.5.3. Ewidencjonowanie wyników inspekcji                               | 406        |
| 7.5.4. Nowe scenariusze pracy inspektorów mostowych                     | 409        |
| 7.6. Wykorzystanie BIM w inspekcji mostów                               | 411        |
| 7.6.1. Cyfryzacja procesu i wyników inspekcji                           | 411        |
| 7.6.2. Aplikacje wspomagające inspekcje mostów                          | 416        |
| 7.6.3. Propozycja polskiej aplikacji dla inspektorów mostowych          | 422        |
| 7.6.3.1. Ogólna prezentacja systemu Smart Bridge Inspector              | 422        |
| 7.6.3.2. Aplikacja stacjonarna                                          | 426        |
| 7.6.3.3. Aplikacja mobilna                                              | 427        |
| 7.6.3.4. Wyświetlanie modelu BIM i poszerzona rzeczywistość             | 429        |
| 7.6.4. Przykłady inspekcji mostów z użyciem cyfrowych technologii       | 431        |
| 7.6.4.1. Inspekcje mostów z użyciem mobilnej aplikacji                  | 431        |



|                                                                                         |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 7.6.4.2. Identyfikacja uszkodzeń mostu z użyciem narzędzi do rekonstrukcji 3D . . . . . | 435        |
| 7.6.4.3. Wykorzystanie robotów inspekcyjnych . . . . .                                  | 443        |
| 7.7. Innowacje i projekty badawcze w infrastrukturze . . . . .                          | 446        |
| <b>8. Zakończenie . . . . .</b>                                                         | <b>452</b> |
| 8.1. Nowe regulacje związane z BIM . . . . .                                            | 452        |
| 8.1.1. Powiązanie przepisów mostowych z metodyką BIM . . . . .                          | 452        |
| 8.1.2. Zagadnienia związane z prawami autorskimi . . . . .                              | 457        |
| 8.1.3. Cyfryzacja procesów i decyzji budowlanych . . . . .                              | 458        |
| 8.1.4. Cyfryzacja rynku zamówień publicznych . . . . .                                  | 459        |
| 8.2. Elementy wdrożenia BIM w mostownictwie . . . . .                                   | 460        |
| 8.2.1. Inicjatywy i promocja metodyki BIM w Polsce . . . . .                            | 460        |
| 8.2.2. Strategie wdrażania BIM . . . . .                                                | 465        |
| 8.2.3. Budowanie świadomości w instytucjach infrastruktury . . . . .                    | 466        |
| 8.2.4. Oczekiwane cele wynikające z wdrożenia metodyki BIM . . . . .                    | 468        |
| 8.2.5. Propozycja najważniejszych działań . . . . .                                     | 471        |
| 8.2.6. Edukacja i szkolenia z metodyki BIM . . . . .                                    | 473        |
| 8.2.7. Rola projektów pilotażowych . . . . .                                            | 477        |
| 8.2.8. Pierwszy projekt pilotażowy BIM w GDDKiA . . . . .                               | 479        |
| 8.3. Podsumowanie . . . . .                                                             | 483        |
| <b>Wykaz ważniejszych skrótów, pojęć i ich definicje . . . . .</b>                      | <b>485</b> |
| <b>Bibliografia . . . . .</b>                                                           | <b>501</b> |
| <b>Spis rycin, w których wykorzystano inne źródła niż własne . . . . .</b>              | <b>522</b> |