

Antoni Skoć | Jacek Spątek

Podstawy KONSTRUKCJI MASZYN

tom 1

obliczenia konstrukcyjne
tolerancje i pasowania
połączenia

Wydawnictwo WNT



*Pamięci
Profesora Ludwika Müllera
naszego nauczyciela i wychowawcy*

Antoni Skoć | Jacek Spałek

Podstawy KONSTRUKCJI MASZYN

tom 1

obliczenia konstrukcyjne

tolerancje i pasowania

połączenia

Autorzy:

prof. dr hab. inż. Antoni Skoć – rozdz. 3, 4, 5, 6

dr inż. Jacek Spalek – rozdz. 1, 2

Opiniodawcy:

dr hab. inż. prof. PC Eugeniusz Mazanek

prof. dr hab. inż. Andrzej Skorupa

Redaktor: *inż. Ewa Kiliś*

Okładkę i strony tytułowe projektował: *Grafos*

Redaktor techniczny: *Anna Szeląg*

Korekta: *Zespół*

Przygotowanie do druku: *Ewa Eckhardt, Marianna Zadrozna*

Wydawca: *Adam Filutowski*

W książce użyto znaków towarowych. Pominięto symbol znaku towarowego, występujący z zastrzeżoną nazwą towaru. Użyto samej tylko nazwy, z taką intencją, aby było to z korzyścią dla właściciela znaku, bez zamiaru naruszania znaku towarowego. Nazwa taka zaczyna się w tekście wielką literą lub jest pisana wielkimi literami.

Książka, którą nabyłeś, jest dziełem twórcy i wydawcy. Prosimy, abyś przestrzegał praw, jakie im przysługują. Jej zawartość możesz udostępnić nieodpłatnie osobom bliskim lub osobiście znanym. Ale nie publikuj jej w internecie. Jeśli cytujesz jej fragmenty, nie zmieniaj ich treści i koniecznie zaznacz, czyje to dzieło. A kopiując jej część, rób to jedynie na użytek osobisty.

Szanujmy cudzą własność i prawo
Więcej na www.legalnakultura.pl
Polska Izba Książki

Copyright © by Wydawnictwo WNT

Warszawa 2006, 2012

Copyright © by Wydawnictwo Naukowe PWN SA

Warszawa 2017

ISBN 978-83-01-19290-7 tom 1

ISBN 978-83-01-19291-4 całość

Wydanie I – 1 dodruk (PWN)

Warszawa 2017

Wydawnictwo Naukowe PWN SA

02-460 Warszawa, ul. Gottlieba Daimlera 2

tel. 22 69 54 321, faks 22 69 54 288

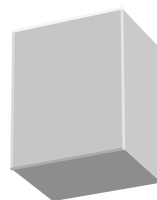
infolinia 801 33 33 88

e-mail: pwn@pwn.com.pl; reklama@pwn.pl

www.pwn.pl

Druk i oprawa: OSDW Azymut Sp. z o.o.

SPIS TREŚCI



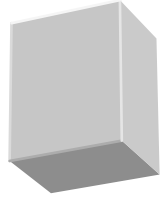
PRZEDMOWA	9
1. WPROWADZENIE DO PODSTAW KONSTRUKCJI MASZYN	11
1.1. Uwarunkowania procesu projektowania maszyn	13
1.2. Obciążenie eksploatacyjne elementów i węzłów konstrukcyjnych maszyn	23
1.2.1. Ogólna charakterystyka obciążenia eksploatacyjnego – 23	
1.2.2. Ogólna charakterystyka obciążenia okresowo zmiennego – 27	
1.2.3. Charakterystyka obciążenia harmonicznie zmiennego – 30	
1.3. Materiały konstrukcyjne stosowane w budowie maszyn	35
Bibliografia	52
2. OBLICZENIA WYTRZYMAŁOŚCIOWE ELEMENTÓW MASZYN PRZY OBCIĄŻENIU ZMIENNYM	55
2.1. Ogólna charakterystyka metod obliczeń wytrzymałościowych	57
2.2. Charakterystyki zmęczenia przy obciążeniu harmonicznie zmiennym	66
2.2.1. Naprężenia zmęczeniowe – 66	
2.2.2. Wyznaczanie wytrzymałości zmęczeniowej – 70	
2.2.3. Wykresy zmęczeniowe – 73	
2.2.4. Wpływ wielkości elementu na wytrzymałość zmęczeniową – 82	
2.3. Wyznaczenie naprężeń obliczeniowych przy obciążeniu harmonicznie zmiennym	86
2.3.1. Wpływ kształtu elementu – 86	
2.3.2. Uwagi o oddziaływaniu karbów wielokrotnych – 98	
2.3.3. Wrażliwość materiału na spiętrzenie naprężeń wywołane karbami – 100	
2.3.4. Wpływ stanu warstwy wierzchniej na wytrzymałość zmęczeniową – 104	
2.4. Zmęczeniowy współczynnik bezpieczeństwa	108
2.4.1. Zmęczeniowy współczynnik bezpieczeństwa dla symetrycznego cyklu obciążenia – 108	
2.4.2. Zmęczeniowy współczynnik bezpieczeństwa dla niesymetrycznego cyklu obciążenia – 109	
2.4.3. Uwagi dotyczące prowadzenia obliczeń zmęczeniowych wstępnych i sprawdzających – 112	
2.5. Obliczenia zmęczeniowe przy obciążeniach złożonych	115
2.6. Obliczenia w zakresie ograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej wysokocyklowej	121

2.7. Obliczenia w zakresie wytrzymałości zmęczeniowej niskocyklowej	123
2.8. Analiza złomów zmęczeniowych	128
2.9. Przykłady obliczeń	133
Bibliografia	139
3. DOKŁADNOŚĆ WYKONANIA ELEMENTÓW MASZYN	141
3.1. Wymiary liniowe	142
3.2. Pasowania	147
3.3. Odchyłki wykonawcze oraz tolerancje kształtu i położenia	152
3.4. Chropowatość i falistość powierzchni	154
3.5. Przykłady obliczeń	169
Bibliografia	174
4. POŁĄCZENIA NIEROZŁĄCZNE	175
4.1. Ogólna charakterystyka połączeń nierozłącznych	175
4.2. Połączenia spawane	176
4.2.1. Ogólna charakterystyka złączy spawanych – 176	
4.2.2. Podstawowe metody spawania i ich charakterystyka – 179	
4.2.3. Własności złączy spawanych, spawalność metali – 184	
4.2.4. Naprężenia i odkształcenia spawalnicze – 189	
4.2.5. Rodzaje złączy spawanych i spoin – 193	
4.2.6. Wymiary obliczeniowe spoin – 206	
4.2.6.1. Spoiny czołowe – 206	
4.2.6.2. Spoiny pachwinowe – 207	
4.2.7. Obliczenia wytrzymałościowe połączeń spawanych obciążonych statycznie – 210	
4.2.7.1. Obliczenia metodą naprężeń dopuszczalnych – 212	
4.2.7.2. Obliczenia metodą stanów granicznych – 223	
4.2.8. Wytrzymałość połączeń spawanych obciążonych zmiennie – 229	
4.2.8.1. Obliczenia wytrzymałościowe metodą naprężeń dopuszczalnych – 234	
4.2.8.2. Zasady sprawdzania nośności połączeń spawanych z uwzględnieniem zakresów zmienności naprężeń – 244	
4.2.9. Wybrane wskazówki konstrukcyjne dotyczące połączeń spawanych i przykłady zastosowań tych połączeń – 248	
4.2.10. Przykłady obliczeń – 258	
4.3. Połączenia zgrzewane	267
4.3.1. Charakterystyka połączeń zgrzewanych – 267	
4.3.2. Metody zgrzewania – 268	
4.3.3. Wybrane wskazówki konstrukcyjne dla połączeń zgrzewanych i przykłady zastosowań tych połączeń – 277	
4.3.4. Obliczenia wytrzymałościowe połączeń zgrzewanych obciążonych statycznie – 287	
4.3.5. Obliczenia wytrzymałościowe połączeń zgrzewanych obciążonych zmiennie – 292	
4.3.6. Przykłady obliczeń – 295	
4.4. Połączenia lutowane	299
4.4.1. Charakterystyka połączeń lutowanych – 299	
4.4.2. Odmiany lutowania i rodzaje lutów – 301	
4.4.3. Wybrane wskazówki konstrukcyjne dotyczące połączeń lutowanych i przykłady zastosowań tych połączeń – 309	
4.4.4. Obliczenia wytrzymałościowe połączeń lutowanych – 314	
4.4.5. Przykłady obliczeń – 318	
4.5. Połączenia klejone	321

4.5.1.	Charakterystyka połączeń klejonych – 321	
4.5.2.	Kleje i ich zastosowanie – 323	
4.5.3.	Kształtowanie złączy klejonych – 329	
4.5.4.	Obliczenia wytrzymałościowe połączeń klejonych – 337	
4.5.4.1.	Własności wytrzymałościowe spoiny klejowej – 337	
4.5.4.2.	Obliczenia wytrzymałościowe połączeń zakładkowych – 343	
4.5.4.3.	Obliczenia wytrzymałościowe połączeń czopowych – 346	
4.5.5.	Przykłady obliczeń – 348	
4.6.	Połączenia nitowe	350
4.6.1.	Charakterystyka procesu nitowania – 350	
4.6.2.	Rodzaje nitów i ich zastosowanie – 352	
4.6.3.	Rodzaje połączeń nitowych i zasady rozmieszczania nitów w konstrukcjach stalowych – 357	
4.6.4.	Obliczenia wytrzymałościowe połączeń nitowych – 361	
4.6.5.	Przykłady obliczeń – 369	
	Bibliografia	373
5.	POŁĄCZENIA ROZŁĄCZNE	375
5.1.	Charakterystyka i klasyfikacja połączeń rozłącznych	375
5.2.	Połączenia śrubowe i gwintowe	377
5.2.1.	Budowa i rodzaje gwintów – 377	
5.2.2.	Zastosowanie gwintów – 382	
5.2.3.	Pasowania gwintów – 385	
5.2.4.	Łączniki śrubowe – 390	
5.2.5.	Połączenia gwintowe – 400	
5.2.6.	Opory tarcia powierzchni gwintowych – 403	
5.2.7.	Sprawność gwintu – 412	
5.2.8.	Obliczenia wytrzymałościowe gwintów – 414	
5.2.9.	Zasady obliczeń wytrzymałościowych śrub – 422	
5.2.10.	Obliczenia połączeń wielośrubowych – 453	
5.2.11.	Zabezpieczenie przed samoczynnym luzowaniem się złączy śrubowych – 467	
5.2.12.	Wybrane wskazówki konstrukcyjne – 469	
5.2.13.	Przykłady obliczeń – 476	
5.3.	Połączenia kształtowe	492
5.3.1.	Połączenia wpustowe – 493	
5.3.2.	Połączenia stożkowe kształtowo-cierne – 500	
5.3.3.	Połączenia klinowe wzdłużne – 502	
5.3.4.	Połączenia wielowypustowe – 510	
5.3.5.	Połączenia wieloząbkowe czołowe – 516	
5.3.6.	Połączenia wieloboczne – 518	
5.3.7.	Połączenia kołkowe – 521	
5.3.8.	Połączenia sworzniowe – 529	
5.3.9.	Przykłady obliczeń – 532	
	Bibliografia	537
6.	POŁĄCZENIA CZOPOWO-CIERNE	539
6.1.	Połączenia wciskowe bezpośrednie	539
6.1.1.	Walcowe połączenia wciskowe – 540	
6.1.1.1.	Obciążalność złącza – 542	
6.1.1.2.	Wytrzymałość elementów łączonych – 547	

6.1.1.3. Odształcenia elementów łączonych – 551	
6.1.1.4. Poprawki wcisku względnego, dobór pasowania – 553	
6.1.1.5. Siła wtlaczania i wytłaczania – 558	
6.1.1.6. Wymagana temperatura piasty i czopa w procesie montażu złącza skurczowego lub rozprężnego – 559	
6.1.1.7. Wybrane wskaźniki konstrukcyjne – 560	
6.1.2. Stożkowe połączenia wciskowe – 565	
6.2. Połączenia wciskowe pośrednie	567
6.3. Połączenia zaciskowe pośrednie	575
6.4. Przykłady obliczeń	579
Bibliografia	592
SKOROWIDZ	593

PRZEDMOWA



Poprawność działania systemów technicznych jest bardzo ważnym zagadnieniem dla wielu dziedzin techniki, zależnym od stanu wiedzy, jaką posiadają konstruktorzy, wytwórcy oraz eksploataccy tych systemów. W uczelniach technicznych zdobywanie wiedzy z tego zakresu odbywa się w ramach odpowiednio ukształtowanego planu studiów. Polega on na stosunkowo wczesnym wprowadzaniu podstawowych przedmiotów z dziedziny techniki, aby następnie na ich podstawie nauczać innych przedmiotów zawodowych. *Podstawy konstrukcji maszyn* należą do tej grupy przedmiotów, które zespalają wiedzę techniczną wielu tradycyjnych dyscyplin podstawowych.

Książka niniejsza jest podręcznikiem akademickim przeznaczonym dla słuchaczy rozpoczynających studiowanie zagadnień związanych z konstruowaniem maszyn, ale może również stanowić istotną pomoc dla inżynierów mechaników z różnych obszarów techniki.

Podstawy konstrukcji maszyn są pierwszym przedmiotem dotyczącym konstruowania, z jakim spotykają się studenci uczelni technicznych. Dlatego też w jego ramach jest przekazywana wiedza, ułatwiająca opanowanie umiejętności projektowania elementów i węzłów konstrukcyjnych maszyn, a jednocześnie stanowiąca pomost między przedmiotami podstawowymi a specjalistycznymi. Wiedzę tę muszą posiadać przede wszystkim studenci kierunków mechanicznych, ale jest ona również potrzebna użytkownikom maszyn, a więc i studentom kierunków niemechanicznych, aby mogli poznać budowę maszyn i właściwie ocenić ich funkcjonalność eksploatacyjną. Zagadnienia zawarte w poszczególnych rozdziałach podręcznika zostały przedstawione tak, aby były zrozumiałe – bez konieczności sięgania do innych źródeł – dla studiujących na kierunkach niemechanicznych. Na kierunkach tych bowiem wiedza z zakresu *wytrzymałości materiałów, inżynierii materiałowej, technologii stosowanych w budowie maszyn* jest wykładana w wąskim zakresie.

Sposób ujęcia zagadnień zawartych w podręczniku umożliwia korzystanie z niego na kilku poziomach studiów. W celu ułatwienia prześledzenia i zrozumienia interesującego Czytelnika materiału ze szczególną wnikliwością zadbano o jasną interpretację fizyczną omawianych problemów.

W tomie pierwszym przedstawiono zagadnienia związane z procesem konstruowania, doбором materiałów konstrukcyjnych, obliczeniami wytrzymałościowymi oraz kształtowaniem postaci konstrukcyjnej i wymiarowaniem połączeń nierozłącznych i rozłącznych stosowanych w budowie maszyn.

Następne tomy będą poświęcone problematyce konstruowania i doboru elementów podatnych, wałów i osi, łożysk, sprzęgieł i hamulców oraz różnego rodzaju przekładni mechanicznych.

Opracowując poszczególne rozdziały, starano się zwrócić uwagę Czytelnika na wzajemne uwarunkowania rozwiązań konstrukcyjnych elementów maszyn i urządzeń współpracujących bezpośrednio ze sobą. Niektóre zagadnienia omówiono szerzej niż w dotychczasowych opracowaniach, zwłaszcza te dotyczące tematyki związanej z połączeniami spawanymi, klejonymi, śrubowymi czy też czopowo-ciernymi.

Przy tworzeniu podręcznika korzystano głównie z aktualnych polskich norm (PN), ale również z norm międzynarodowych (ISO) i europejskich (EN). Normy te, ze względu na zwięzłość przyjętego w nich zapisu, a także wprowadzane zmiany formalne oraz merytoryczne przy braku komentarza, są w wielu przypadkach trudne do zrozumienia. Dlatego przy ich omawianiu szczególną uwagę zwrócono na wyjaśnienie treści merytorycznej.

Przykładowe zadania, podsumowujące dany rozdział, wybrano i przedstawiono ze szczególną troską o to, aby w maksymalnym stopniu pokazać fizyczną interpretację omawianych zagadnień.

Jak już nadmieniono, opracowując niniejszy podręcznik założono, że będą z niego korzystać studenci uczelni technicznych studiujący na różnych kierunkach oraz inżynierowie konstruktorzy i użytkownicy maszyn. Dlatego został on przygotowany w taki sposób, aby łatwe było korzystanie przez Czytelnika pomimo różnic w poziomie posiadanej wiedzy ogólnej i zawodowej.

Autorzy wyrażają wdzięczność recenzentom za ich rzeczowe i wnikliwie opinie, które stanowiły cenny wkład w podniesienie merytorycznego poziomu podręcznika. Wyrazy podziękowania kierują też do swoich współpracowników, kolegów z Zakładu Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn, za cenne uwagi wniesione w dyskusjach dotyczących tematyki podręcznika. Dziękują zwłaszcza dr. inż. Przemysławowi Grzesicy i mgr. inż. Krzysztofowi Twardochowi za szczególną pomoc w przygotowaniu ilustracji, a Panu Andrzejowi Droździokowi za trud sporządzenia komputerowego składu podręcznika.

Autorzy będą wdzięczni za przekazanie opinii dotyczących doboru materiału, sposobu przedstawienia go oraz układu podręcznika. Z góry przepraszają za niedociągnięcia. Wszystkie nadesłane uwagi przyjmą z życzliwością, wnikliwie przeanalizują i uwzględnią przy opracowywaniu następnego wydania podręcznika.

WPROWADZENIE DO PODSTAW KONSTRUKCJI MASZYN



Przedmiot o nazwie *Podstawy konstrukcji maszyn* (w skrócie PKM) stanowi interdyscyplinarną dziedzinę naukowo-dydaktyczną w obszarze inżynierii mechanicznej, a zwłaszcza w budowie maszyn. Nazwa ta pojawiła się w Polsce w połowie lat sześćdziesiątych XX w., kiedy to ukazał się pierwszy 3-częściowy podręcznik o tym tytule [6], [7], [13]. Powstanie tej samodzielnej dziedziny było konsekwencją rozwoju metod projektowania i konstruowania obiektów mechanicznych i ich elementów, a także potrzeby wzbogacenia treści ujmowanej w klasycznym wykładzie z przedmiotu o nazwie *Części maszyn* bądź *Elementy maszyn*. Wzbogacenie tej treści polega głównie na ogólniejszym spojrzeniu na cały przebieg procesu powstawania i istnienia obiektu w fazach projektowania, wytwarzania i eksploatacji.

O celowości rozwijania samodzielnej dziedziny PKM świadczą odbywające się cyklicznie od ponad 40 lat Sympozjony (w roku 2005 odbył się XXII Sympozjon PKM), będące forum prezentacji wyników badań naukowych oraz działalności dydaktycznej, prowadzonej w tym obszarze przez różne jednostki organizacyjne (instytuty, katedry, zakłady) uczelni technicznych w Polsce.

Istota merytoryczna przedmiotu PKM polega na wykorzystaniu wiedzy z zakresu nauk ogólnych (matematyka, fizyka, chemia itp.) oraz podstawowych technicznych (mechanika stosowana, termodynamika, mechanika płynów, wytrzymałość materiałów, informatyka itd.) i uporządkowaniu jej w taki sposób, aby w procesie projektowania uzyskać możliwie najlepsze rozwiązanie konstrukcyjne lub ogólniej optymalną konstrukcję.

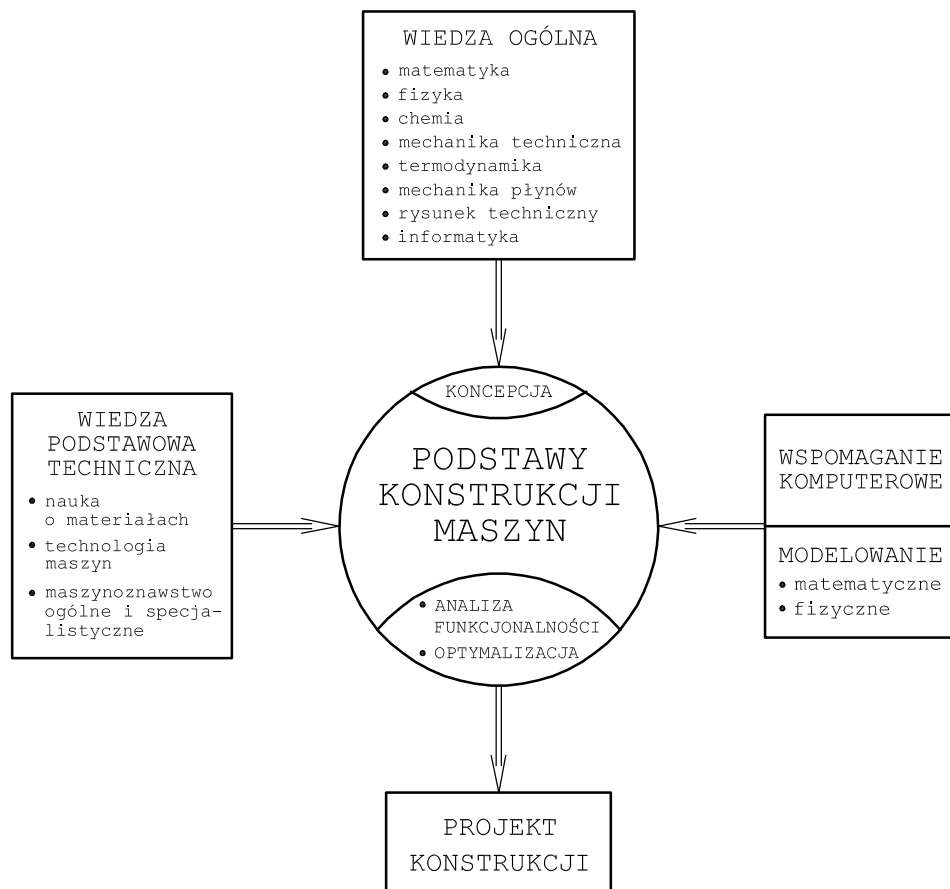
Pod pojęciem *konstrukcji* rozumiemy w tym przypadku pewną optymalnie uporządkowaną graficzną lub analityczną strukturę odwzorowującą projektowany obiekt techniczny, np. maszynę czy urządzenie mechaniczne.

Według J. Dietrycha [8] *maszyna* jest wytworem wykonującym pożądane działanie dzięki energii dostarczonej z zewnątrz. W tej definicji *wytwór* jest rozumiany jako układ materialny, pożądane działanie zaś polega na przekształcaniu jednej postaci energii w drugą. Stąd, w zależności od form przekształcenia energii, można wyróżnić *silniki* i *maszyny robocze*.

Maszynami roboczymi są:

- ♦ *maszyny technologiczne*, służące do przetwarzania surowców lub materiałów w produkty gotowe (rynkowe); do tej grupy należą obrabiarki, maszyny górnicze, budowlane, drogowe, rolnicze itp.;
- ♦ *maszyny energetyczne*, dokonujące przetworzenia energii, jak: sprężarki, pompy, turbiny itp.;
- ♦ *maszyny transportowe*, służące do przemieszczania materiałów, przedmiotów czy ludzi; zaliczamy tu pojazdy samochodowe i szynowe, statki powietrzne, okręty, przenośniki, dźwignice itp.

Według ustaleń Unii Europejskiej (dyrektywa nr 89/392/EWG) *maszynę* tworzą powiązane ze sobą elementy, przy czym co najmniej jeden z nich jest ruchomy. Maszyną jest też zespół pojedynczych maszyn połączonych ze sobą tak, że działa on jako jedna całość [17]. Urządzenie jest bardziej rozwiniętą postacią maszyny określonego przeznaczenia wraz z układami sterowania, kon-



Rysunek 1.1. Usytuowanie przedmiotu *Podstawy konstrukcji maszyn* w strukturze wiedzy ogólnej i technicznej

troli, a także ze strukturami wsporczymi (np. przenośniki, dźwignice, sieci technologiczne). Nie popełnia się tu błędów, kwalifikując różnego rodzaju urządzenia mechaniczne jako maszyny.

W projektowaniu (tworzeniu) maszyny [17] należy uwzględnić dwie główne (ogólne) zasady:

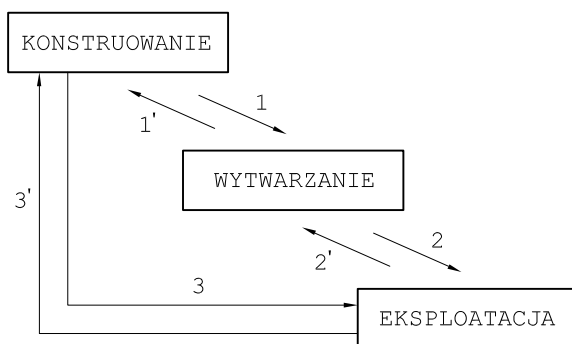
- ♦ zasadę funkcjonalności (inaczej dobroci konstrukcji), mówiącą o tym, że konstrukcja musi spełniać wszystkie sformułowane podstawowe warunki projektowe w stopniu równym lub wyższym od założonych;
- ♦ zasadę optymalności, determinującą uzyskanie w procesie projektowania konstrukcji optymalnej ze względu na przyjęte kryteria, np. takie jak: niezawodność, wytrzymałość, trwałość, sprawność, technologiczność, ergonomiczność czy kryteria ekologiczne.

W wyniku spełnienia zasady funkcjonalności uzyskuje się zbiór dobrych rozwiązań konstrukcyjnych, w którym można wyróżnić rozwiązanie najlepsze, tzw. optymalne ze względu na stawiane kryteria.

W tym kontekście istota przedmiotu PKM polega na takim uporządkowaniu wiedzy ogólnej i technicznej, aby w wyniku jej wykorzystania powstała dobra konstrukcja maszyny, realizująca w sposób optymalny zakładaną funkcję użytkowego działania. Schematycznie zilustrowano to na rys. 1.1.

1.1. Uwarunkowania procesu projektowania maszyn

Proces tworzenia obiektów technicznych, w tym maszyn oraz ich elementów bądź węzłów konstrukcyjnych, jest bardzo złożonym postępowaniem w łańcuchu projektowym, który wymaga możliwie najogólniejszego ujęcia. W tym ujęciu oprócz samej fazy projektowania i konstruowania obiektu technicznego należy uwzględnić fazy następne, a mianowicie wytwarzanie oraz eksploatację (użytkowanie). Graficzne usytuowanie tych faz pokazano na rys. 1.1.1.

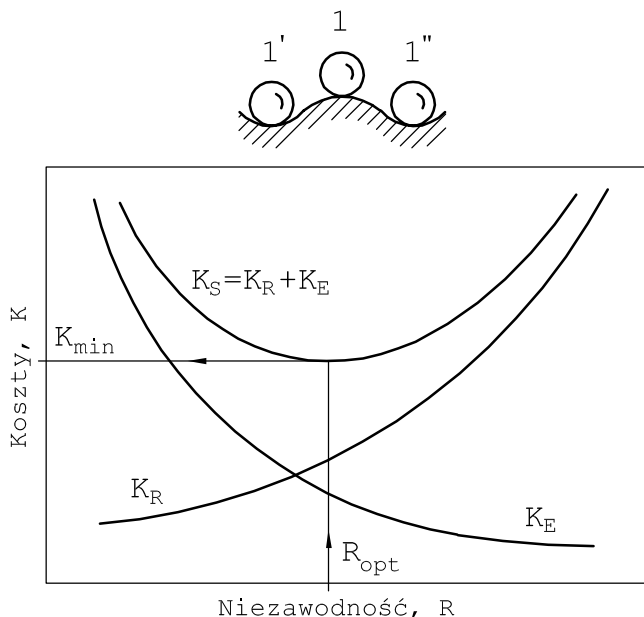


Rysunek 1.1.1. Fazy istnienia obiektu technicznego z systemem sprzężeń zwrotnych

Jak widać, fazy te tworzą zamknięty system sprzężeń zwrotnych. Oznacza to, że *faza konstruowania* (wynikiem której jest rozwiązanie techniczne zwane *konstrukcją*) jest bezpośrednio powiązana z *fazami wytwarzania i eksploatacji*, a konstruktor musi uwzględniać uwarunkowania z nich wynikające. Naturalna jest więc konieczność uwzględnienia zagadnień technologicznych, ale także powinny być spełnione warunki związane z użytkowaniem projektowanej maszyny.

Podkreślić należy, że w licznych przypadkach uzyskanie niezbędnych sprzężeń zwrotnych, a zwłaszcza sprzężeń oznaczonych cyframi 3 i 3', jest bardzo trudne. Na rysunku 1.1.1 nieprzypadkowo poszczególne fazy ujęto w formie schodów. Ma to obrazować stopień trudności uzyskiwania sprzężeń (informacji) przez konstruktora. Najtrudniejsze jak wiadomo jest wchodzenie po schodach, a zwłaszcza *co dwa stopnie*, co należy odnieść do sprzężenia oznaczonego przez 3'.

Ponadto, aby wytworzony obiekt cieszył się względnie długim okresem sukcesu rynkowego, należy rozpoznać występujące w danej branży perspektywiczne strategie ekonomiczne, które są zależne od wybranych kryteriów zasadniczych.



Rysunek 1.1.2. Przedstawienie poglądowe kosztów K istnienia obiektu technicznego w zależności od zakładanej niezawodności R ; K_S – koszty sumaryczne; $K_S = K_R + K_E$; K_R – koszty realizacji (projektowania i wytwarzania); K_E – koszty eksploatacji (użytkowania i napraw); K_{min} – minimalny koszt sumaryczny (dla $R = R_{opt}$); R_{opt} – niezawodność optymalna (dla $K = K_{min}$)

Na rysunku 1.1.2 przedstawiono poglądowo zależność *kosztów istnienia obiektu technicznego* w zależności od jego niezawodności, zakładanej na etapie projektowania.

Po analizie rys. 1.1.2 można stwierdzić, że istnieje niezawodność optymalna R_{opt} w przedziale $R \in [0, 1]$, dla której koszty sumaryczne są minimalne. Symbo-