

# Wstęp

Systemy wspomagania projektowania CAD (Computer Aided Design) wspomagają pracę inżyniera na etapach projektowania i konstruowania. W większości programy te umożliwiają trójwymiarowe modelowanie geometryczne oraz opracowanie dokumentacji technicznej. Obecnie stosowane systemy CAD łączą w sobie cechy systemów CAM (Computer Aided Manufacturing) oraz CAE (Computer Aided Engineering).

W skrypcie przedstawiono przykłady zastosowania wspomagania prac inżynierskich i obliczeń inżynierskich z zastosowaniem programu Autodesk Inventor Professional 2017 [15]. Firma Autodesk udostępnia pełną wersję tego programu studentom do nauki projektowania. Program Inventor dostępny jest pod adresem <http://www.autodesk.com/education/home>.

Autodesk Inventor będący typowym przykładem programu CAD posiada również narzędzia charakterystyczne dla programów wspomagających prowadzenie obliczeń inżynierskich (CAE). Dotyczy to obliczeń oraz doboru i weryfikacji przekładni mechanicznych (zębatach, paskowych i łańcuchowych), weryfikacji wałów, doboru łożysk tocznych i połączeń czopowych oraz weryfikacji wytrzymałościowej spoin i śrub. Pomoc do narzędzi programu Inventor jest dostępna pod adresem <http://help.autodesk.com/view/INVENTOR/2017/PLK>

Skrypt przeznaczony jest dla studentów kierunków automatyka i robotyka, mechatronika, mechanika i budowa maszyn lub inżynierii produkcji. Ma stanowić pomoc do zajęć projektowych z przedmiotu podstawy konstrukcji maszyn oraz może być wykorzystany przy wykonywaniu zajęć laboratoryjnych. Przy opracowywaniu skryptu założono, że materiał dotyczący poszczególnych zagadnień konstrukcyjnych jest studentom znany z wykładów z przedmiotu podstawy konstrukcji maszyn lub ze wskazanej w skrypcie literatury.

W skrypcie omówiono zagadnienia dotyczące zastosowania programu CAD w obliczaniu geometrii i weryfikacji wytrzymałościowej kół zębatach, obliczaniu wałów, weryfikacji łożysk tocznych oraz połączeń wpustowych.

Rysunki zamieszczone w skrypcie nie stanowią dokumentacji projektowej, ale mają charakter poglądowy. W wielu przypadkach w polskiej wersji Autodesk Inventor są zastosowane nazwy wielkości odmienne od ogólnie przyjętych w polskiej literaturze technicznej. W skrypcie w przypadku występowania takich różnic zwrócono na to uwagę.

# 1. Dobór cech konstrukcyjnych zazębienia

W rozdziale opisano dobór cech i weryfikację wytrzymałościową kół przekładni walcowych o zębach skośnych (śrubowych) z zastosowaniem dostępnego w programie Inventor narzędzia o nazwie *Kreator komponentów przekładni walcowych*. Założono, że obliczenia geometrii prowadzone będą zgodnie z polskimi normami z zachowaniem znormalizowanego zarysu odniesienia [10]. Weryfikacja wytrzymałościowa zębów zostanie przeprowadzona z zastosowaniem norm PN/ISO 6336 [7].

## 1.1. Podstawowe wielkości opisujące zazębienia walcowe

W rozdziale przedstawiono jedynie podstawowe informacje dotyczące geometrii zazębienia zwracając uwagę na wielkości (parametry) wysypujące w oknach dialogowych *Kreatora komponentów przekładni walcowych*. Założono, że studentom korzystającym ze skryptu zagadnienia dotyczące konstruowania zazębienia ewolwentowego są znane z wykładów z przedmiotu podstawy konstrukcji maszyn lub z literatury.

Na rysunku 1.1 przedstawiono podstawowe wielkości opisujące geometrię kół walcowych o zębach prostych. Na całym obwodzie koła zęby rozmieszczone są w jednakowych odstępach, równych podziałce  $p$ . Średnica okręgu, na którym mierzona jest podziałka uzębienia  $p$  nazywana jest średnicą podziałową  $d$ . Obwód koła podziałowego jest równy iloczynowi liczby zębów  $z$  i podziałki  $p$

$$\pi \cdot d = z \cdot p \quad (1-1)$$

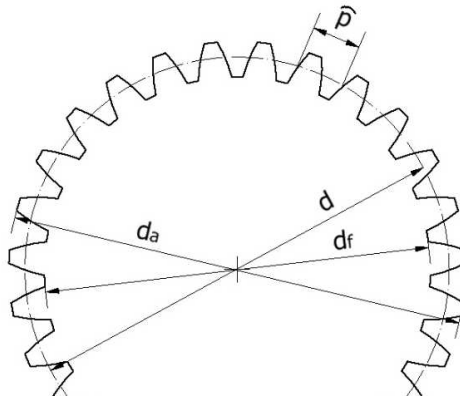
Na podstawie wzoru 1.1 wyznaczyć można średnicę podziałową  $d$

$$d = z \cdot \frac{p}{\pi} = z \cdot m \quad (1-2)$$

gdzie  $m = p/\pi$  jest modułem. Moduł, który jest wyrażany w milimetrach, określa wielkość zęba a jego wartości są znormalizowane [9], co przedstawiono w tabeli 1.1

**Tablica 1.1.** Wybrane znormalizowane wartości modułu na podstawie PN-ISO 54:2001

Szereg	Wartości modułów w milimetrach							
1	2	2,5	3	4	5	6	8	10
2	2,25	2,75	3,5	4,5	5,5	7	9	11



**Rys. 1.1.** Podstawowe wielkości (parametry) opisujące geometrię kół zębatach walcowych o zębach prostych

Podstawowe wielkości (parametry) opisujące geometrię kół zębatach walcowych o zębach prostych przedstawiono na rysunku 1.1. Dla znormalizowanego zarysu odniesienia, zgodnie z normą PN-ISO 53:2001 [10] średnicę wierzchołków zębów  $d_a$  oraz średnicę podstaw  $d_f$  wyznaczamy ze wzorów

$$d_a = d + 2 \cdot m \quad (1-3)$$

$$d_f = d - 2,5 \cdot m \quad (1-4)$$

W przypadku, gdy korekcja zazębienia nie jest stosowana koła podziałowe dwóch współpracujących kół zębatach są styczne a odległość między osiami kół zębatach wyznaczamy ze wzoru

$$a = \frac{d_1 + d_2}{2} = \frac{z_1 + z_2}{2} \cdot m \quad (1-5)$$

**Tablica 1.2.** Wybrane znormalizowane wartości odległości między osiami na podstawie PN-93/M-88525 [11].

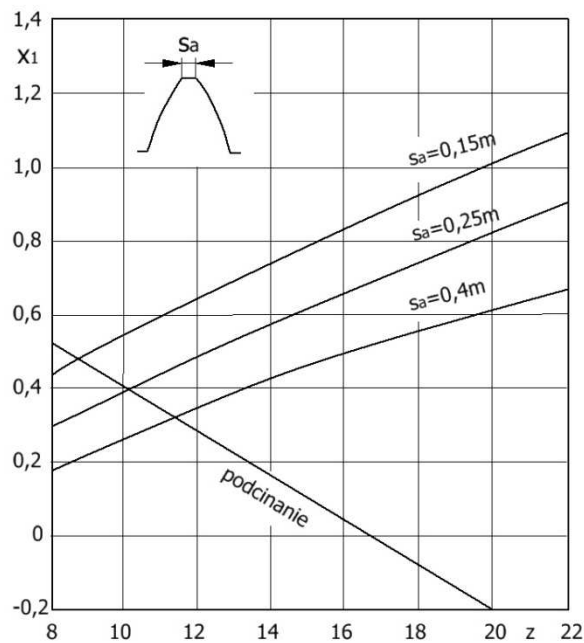
Szereg	Znormalizowane odległości osi $a_w$										
1	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800
2	90	112	140	180	225	280	355	450	560	710	900

Odległości między osiami kół zębatach są znormalizowane, co przedstawiono w tabeli 1.2. Biorąc pod uwagę: wymagane przełożenie przekładni, znormalizowaną wartość modułu oraz, że liczby zębów obydwu kół są liczbami całkowitymi uzyskanie znormalizowanej odległości między osiami bez zastosowania korekcji jest praktycznie niemożliwe. Zastosowanie korekcji o dodatnim sumarycznym współczynniku przesunięcia zarysu  $x$  umożliwia uzyskanie znormalizowanej odległości osi kół zgodnie ze wzorem [3]

$$a_w = \left( \frac{z_1 + z_2}{2} + x - y \right) \cdot m \quad (1-6)$$

gdzie  $y$  jest współczynnikiem określającym skrócenie głów zębów ze względu na zachowanie luzu wierzchołkowego.

Odpowiednio dobrany dodatni współczynnik przesunięcia zarysu, szczególnie dla koła małego  $x_1$ , poprawia właściwości wytrzymałościowe zębów oraz umożliwia wykonanie koła o małej liczbie zębów bez podcinania stopy zęba. Graniczne dopuszczalne wartości współczynników przesunięcia zarysu w funkcji liczby zębów  $z$  ze względu na podcięcie stopy zęba oraz zmniejszenie szerokości głowy zęba  $s_a$  przedstawiono na rysunku 1.2. Dla zębów hartowanych powierzchniowo szerokość głowy zęba nie powinna być mniejsza od  $0,4m$ , czyli współczynnik korekcji nie powinien przekraczać linii oznaczonej na rysunku  $s_a = 0,4m$ .



**Rys.1.2.** Graniczne ze względu na zaostrenie głowy i podcięcie stopy zęba wartości współczynników przesunięcia zarysu  $x$  w funkcji liczby zębów  $z_1$  [2]

Koła zębate o zębach skośnych (śrubowych) w porównaniu do kół o zębach prostych przenoszą większe obciążenia oraz podczas pracy generują mniejsze drgania i hałas. Do wykonywania metodą obwiedniową kół o zębach skośnych są stosowane te same narzędzia jak do kół o zębach prostych. Ruch roboczy zębatki będącej narzędziem odbywa się pod kątem do tworzącej walca będącym kątem pochylenia linii zębów. To powoduje, że w płaszczyźnie normalnej, czyli prostopadłej do linii zęba, geometria

zębów skośnych odpowiada geometrii narzędzia o znormalizowanym zarysie. W płaszczyźnie normalnej moduł zębów jest równy modułowi narzędzia  $m_n = m$ . Natomiast w płaszczyźnie czołowej, prostopadłej do osi koła zębatego, moduł czołowy można określić ze wzoru

$$m_t = \frac{m_n}{\cos\beta} \quad (1-7)$$

gdzie  $\beta$  jest kątem pochylenia linii zębów na walcu podziałowym.

Parametry opisujące geometrie zazębienia w płaszczyźnie czołowej są wyznaczane na podstawie modułu czołowego, na przykład średnica podziałowa w płaszczyźnie czołowej

$$d_t = z \cdot m_t \quad (1-8)$$

Należy zwrócić uwagę, że w *Kreatorze komponentów przekładni walcowej* w przypadku części oznaczeń parametrów nie są stosowane indeksy rozróżniające płaszczyznę normalną i czołową.

## 1.2. Projektowanie kół zębatych z zastosowaniem Inventora

Dostępny w programie Inventor *Kreator komponentów przekładni walcowej* umożliwia obliczanie cech geometrycznych kół zębatych oraz ich weryfikację wytrzymałościową a następnie generowanie trójwymiarowego modelu kół zębatych.

Podczas doboru cech konstrukcyjnych zazębienia, w zależności od wymagań konstrukcyjnych stawianych przekładni, wybrane cechy są zakładane, na przykład takie jak przełożenie, odległość między osiami i materiał kół zębatych natomiast pozostałe cechy geometryczne są wyznaczane. Dla dobranych parametrów zazębienia dokonywana jest weryfikacja wytrzymałościowa zębów. Często podczas doboru cech konstrukcyjnych zazębienia prowadzona jest optymalizacja, której celem jest uzyskanie na przykład przekładni o minimalnej wielkości lub masie.

Aby rozpocząć pracę z *Kreatorem komponentów przekładni walcowej* należy utworzyć plik typu *Zespół* najlepiej wybierając szablon *Standard(mm).iam*, nadać mu nazwę (na przykład *Koła przekładni.iam*) i zapisać (rys. 1.3). Następnie ze wstążki narzędziowej należy rozwinąć zakładkę *Projekt* i w panelu *Przekładnie* wybrać *Przekładnia walcowa* (rys. 1.4).

Kreator komponentów przekładni walcowej korzysta z dwóch okien dialogowych o nazwach *Projekt* i *Obliczenia*. Pierwsze jest otwierane przedstawione na rysunku 1.5 okno *Projekt* umożliwiające dobór cech geometrycznych przekładni. Kreator otwiera okno z domyślnymi wartościami parametrów lub z ostatnimi ustawieniami (jeżeli wcześniej kreator był wykorzystywany do obliczeń geometrii zazębienia).