

## Zastosowanie modułu symulacji dynamicznej programu CAD w analizie układu napędowego elektronarzędzia

**Streszczenie.** W referacie przedstawiono analizę mechanicznego układu przeniesienia napędu elektronarzędzia (wyrzynarki elektrycznej) przy zastosowaniu Modułu Symulacji Dynamicznej (MSD) programu Autodesk Inventor (AI). Opracowano modele 3D poszczególnych części elektronarzędzia i połączono je przy zachowaniu tzw. kinematyki odwrotnej. Przeprowadzono analizę wpływu poszczególnych węzłów kinetycznych na przebieg momentu na wale silnika elektrycznego. Wykazano, które węzły mają największy wpływ na wartość średnią i harmoniczne momentu.

**Abstract.** The paper presents an analysis of the mechanical drive transmission system of the electric power tools (electric jigsaw) using the Dynamic Simulation Modules (DSM) from the Autodesk Inventor (AI). The 3D geometric models of the power tool various parts was developed and assembled using inverse kinematics rules. The analysis of the influence of each kinematic node on the electric motor shaft torque was performed. It has been shown which kinetic nodes of the mechanical transmission system have the greatest impact on the average value and the harmonic of the torque. (Dynamic simulation module from the cad software used to analyze the drive system of the electric power tools).

**Słowa kluczowe:** elektronarzędzia, symulacja dynamiczna, moment mechaniczny, Autodesk Inventor.

**Keywords:** electric power tools, dynamic simulation, mechanical torque, Autodesk Inventor.

### Wstęp

Nowoczesne sposoby projektowania elektronarzędzi realizowane są z wykorzystaniem pakietów CAD (ang. Computer Aided Design), CAM (ang. Computer Aided Manufacturing) oraz CAE (ang. Computer Aided Engineering) [1]. W ogólnie pojętej inżynierii elektrycznej samo pojęcie CAD obejmuje szereg różnych zagadnień: obliczenia projektowe, modelowanie geometryczne, przygotowanie dokumentacji technicznej, itd. [2,3]. Do celów projektowania w systemie CAD/CAM/CAE wykorzystuje się szereg programów. Dąży się do tego, aby CAD/CAM/CAE były zintegrowanymi modułami w jednym programie. Gwarantuje to zazwyczaj lepszą współpracę różnych modułów i umożliwia implementację procedur optymalizacyjnych. Wśród szeregu pakietów integrujących procesy CAD/CAM/CAE jest program Autodesk Inventor (AI) [3,5].

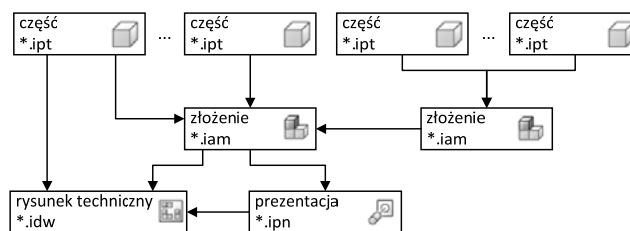
W tej pracy autorzy podjęli próbę oceny przydatności programu AI do analizy mechanicznego układu przeniesienia napędu (UPN) wyrzynarki elektrycznej typu STEB 70 firmy METABO. Znamionowa moc na wyjściu UPN wynosi 335 W, natomiast moc pobierana z sieci wynosi 570 W. UPN traktowany jest w tej pracy jako łańcuch kinematyczny pomiędzy wałkiem silnika elektrycznego a nożem wyrzynarki, w którego skład wchodzi szereg węzłów mechanicznych. Ten łańcuch kinematyczny zawiera zbiór elementów bezwładnościowych w ruchu obrotowym i postępowym. W każdym węzle tego łańcucha występuje tarcie wiskotyczne i tarcie suche. Rozkład masy w ruchu obrotowym i postępowym w UPN wyrzynarki ma istotny wpływ na dynamikę momentu, natomiast wartości parametrów tarcia mają istotny wpływ na sprawność elektronarzędzia. W pracy dokonano analizy wpływu istotnych węzłów łańcucha kinematycznego na przebieg momentu mechanicznego przy wymuszonej stałej prędkości obrotowej wirnika. W celu jednoznacznej oceny tego wpływu założono, że parametry tarcia suchego oraz wiskotycznego w ruchu obrotowym są takie same. Założono również, że parametry tarcia węzłów w ruchu postępowym są takie same.

Pracę podzielono na etapy, które rozpoczynają się od opracowania złożenia komputerowego modelu 3D wyrzynarki w programie Autodesk Inventor. Następnie omówiono sposób implementacji modelu 3D wyrzynarki w Module Symulacji Dynamicznej (MSD). W kolejnym rozdziale przedstawiono sposób definiowania parametrów

tarcia węzłów łańcucha kinematycznego do potrzeb symulacji. Następnie pokazano wybrane wyniki symulacji dynamicznej oraz podano istotne wnioski wynikające z analizy wyników symulacji.

### Komputerowy model 3D wyrzynarki Typy plików w programie AI

Program Autodesk Inventor oparty jest na określonym systemie plików, w których zawarte są zasoby reprezentujące modele 3D oraz ich wzajemne relacje. Podstawowe typy plików wykorzystywane w pracy z programem AI to: części (IPT), złożenia (IAM), prezentacje (IPN) oraz rysunki techniczne (IDW). Pomędzy tymi plikami zachowane są ścisłe relacje (rys.1). Pliki złożzeń są zasadniczo zbiorami części. Pliki prezentacji bazują na plikach złożzeń. Pliki IDW prezentują zasoby zawarte w plikach IPT oraz IAM.



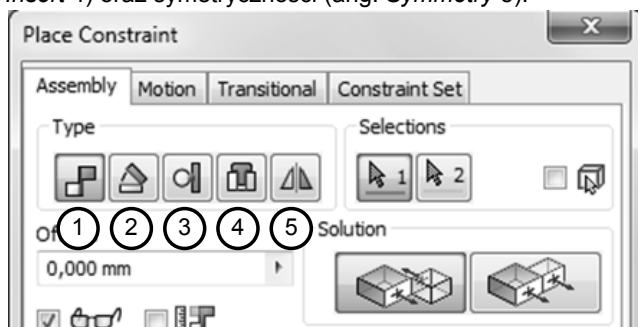
Rys. 1. Relacje pomiędzy różnymi typami plików w programie AI

Pliki części charakteryzują się tym, że komputerowy model 3D obiektu reprezentuje ciągłą, litą i jednorodną strukturę o takich samych właściwościach fizycznych. Pliki złożzeń charakteryzują się tym, że model obiektu jest zbiorem odpowiednio połączonych ze sobą modeli 3D poszczególnych części. Aby to złożenie było efektywne w programie AI zaimplementowany jest mechanizm wiązań, który umożliwia precyzyjne pozycjonowanie części względem siebie.

### Opracowanie złożenia wyrzynarki STEB 70

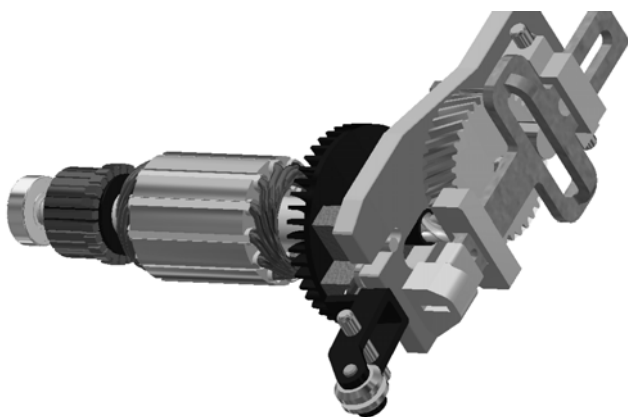
Składanie części w złożenie/zespół realizowane jest w osobnym module programu AI (format pliku - IAM). Do precyzyjnego osadzania części złożenia względem siebie wykorzystuje się zaimplementowany w programie AI mechanizm wiązań części i podzespołów. Na rysunku 2 pokazano przyborek z narzędziami wiązań, który zawiera

tw. wiązania: zestawiające (ang. *Mate* 1), kątowe (ang. *Angle* 2), styczne (ang. *Tangent* 3), wstawiające (ang. *Insert* 4) oraz symetryczności (ang. *Symmetry* 5).



Rys. 2. Przybornik z narzędziami wiązań części i podzespołów, wiązanie: (1) zestawiające, (2) kątowe, (3) styczne, (4) wstawiające, (5) symetryczne

Na rysunku 3 pokazano końcowe złożenie istotnych do analizy łańcucha kinematycznego części wyrzynarki.



Rys. 3. Złożenie części łańcucha kinematycznego wyrzynarki w programie AI

### Moduł symulacji dynamicznej AI

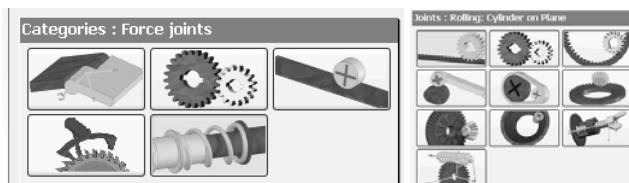
Moduł Symulacji Dynamicznej (MSD) programu Autodesk Inventor umożliwia wyznaczenie przemieszczeń, prędkości, przyspieszeń oraz sił reakcji i momentów działających na poszczególne połączenia obiektu pod wpływem wymuszeń zewnętrznych zdefiniowanych przez użytkownika. Przeprowadzenie symulacji odbieraka w MSD wymaga realizacji następujących etapów:

- Uruchomienie modułu MSD z poziomu pliku IAM. Jest to automatycznie aktywowana procedura poprzez wybranie opcji *Dynamic Simulation* z zakładki *Environments* programu Inventor.
- Zdefiniowanie odpowiednich połączeń ruchomych względem siebie elementów tak, aby odwzorować stopnie swobody układu przeniesienia napędu.
- Wprowadzenie wartości parametrów określających właściwości lepko-sprężyste poszczególnych połączeń.
- Zdefiniowanie sił i momentów zewnętrznych działających na układ przeniesienia napędu.

### Zdefiniowanie połączeń łańcucha kinematycznego

Moduł MSD podejmuje próbę automatycznego przekształcenia niektórych wiązań zdefiniowanych w pliku złożenia IAM na odpowiadające im połączenia w MSD. Konwersja wiązań typu zestawiającego (ang. *Mate*) może być zrealizowana z niektórymi wyjątkami poprawnie. Inne więzy nie zostaną uwzględnione i do zadań projektanta należy zdefiniowanie brakujących połączeń i ewentualnie poprawienie tych, które zostały błędnie przekształcone. Do definiowania nowych lub redefiniowania już istniejących

połączeń służy odpowiedni przybornik ułatwiający w sposób graficzny wybór typu połączenia oraz sposób nakładania. Narzędzia połączeń są pogrupowane w pięciu kategoriach (rys.4). W każdej kategorii znajduje się od kilku do kilkunastu szczegółowych typów połączeń.

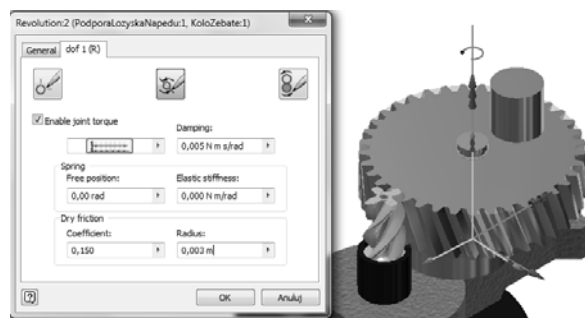


Rys. 4. Kategorie połączeń łańcucha kinematycznego w module MSD

W modelu wyrzynarki STEB 70 zdefiniowano łańcuch kinematyczny złożony z trzynastu połączeń. Większość połączeń skojarzonych jest z ruchem obrotowym oraz ruchem postępowym. Występują także połączenia reprezentujące zestyk ślizgowy pomiędzy powierzchniami walcowymi i płaszczyznami. Omówienie szczegółowe poszczególnych połączeń wychodzi poza zakres tej pracy. W analizie uwzględniono jedynie te połączenia, które mają istotny wpływ na przebieg momentu mechanicznego i straty mocy mechanicznej w układzie przeniesienia napędu wyrzynarki. Połączenia te zostały oznaczone symbolami: W1, W2, W3 i W4 a ich prezentacja graficzna pokazana jest odpowiednio na rysunkach 6, 7, 8 i 9.

### Edycja wymuszeń i parametrów połączeń

Każde połączenie w module MSD charakteryzowane jest zbiorem parametrów, które określają jego właściwości sprężyste i tłumiące. Właściwości te mogą być definiowane jako: wartości stałe, funkcje czasu lub funkcje współrzędnych (przemieszczenia, prędkości, przyspieszenia). Ta ostatnia cecha jest bardzo istotna, gdyż umożliwia analizę układów dynamicznych z uwzględnieniem nieliniowych parametrów. Na rysunku 5 pokazano przykład definiowania parametrów tarcia wiskotycznego i suchego połączenia W1 analizowanego łańcucha kinematycznego. Połączenie W1 reprezentuje przekładnię zębatą o przełożeniu 4:37.



Rys. 5. Edycja parametrów tarcia suchego i wiskotycznego przy połączeniu W1 o ruchu obrotowym

Tabela 1. Parametry tarcia wiskotycznego i suchego połączeń w węzłach o ruchu obrotowym i postępowym

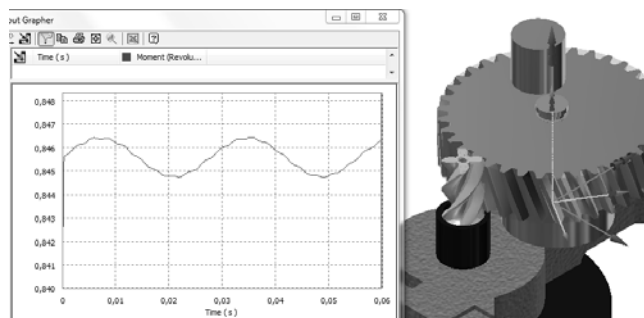
Współczynnik tłumienia wiskotycznego w ruchu obrotowym	0,005 Nms/rad
Współczynnik tarcia suchego w ruchu obrotowym	0,15
Współczynnik tłumienia wiskotycznego w ruchu postępowym	0,01 Ns/m
Współczynnik tarcia suchego w ruchu postępowym	0,15

Scenariusz symulacji polegał na wymuszeniu stałej prędkości obrotowej wirnika silnika  $n=20000$  obr/min i

analizie wpływu kolejno dodawanych do siebie połączeń W1, W2, W3, W4 i W5 na przebieg momentu działającego na wałek silnika elektrycznego. Założono przy tym stałe wartości parametrów tarcia suchego i wiskotycznego podanych w Tabeli 1.

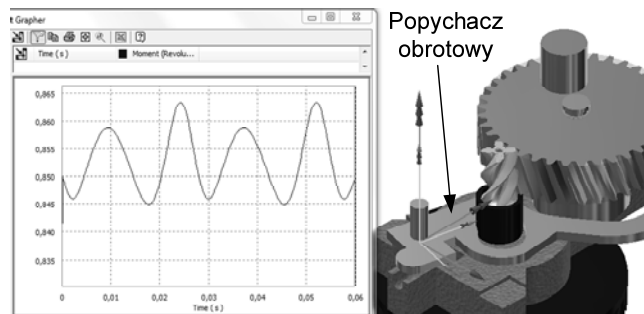
### Wyniki symulacji dynamicznej

Czas prezentowanych symulacji dobrano tak, aby zawierał ponad 2 pełne cykle ruchu postępowego noża maszyny. Na rysunku 6 pokazano przebieg momentu działającego na wałek silnika przy połączeniu W1. Jest to połączenie reprezentujące przekładnię zębatą w ruchu obrotowym obydwu kół. Koło zębate o większej średnicy ma niesymetryczny rozkład masy względem osi obrotu (dwa walce osadzone mimośrodkowo).



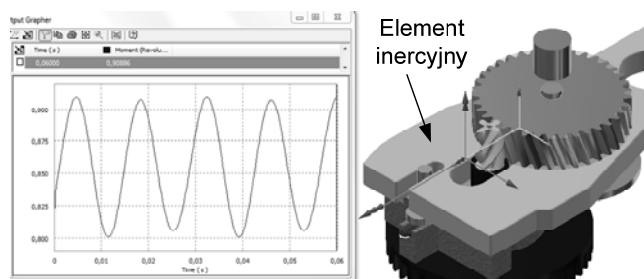
Rys. 6. Przebieg momentu przy uwzględnieniu połączenia W1 (przekładnia zębata)

Na rysunku 7 pokazano przebieg momentu działającego na wałek silnika przy połączeniu W1+W2. Połączenie W2 uwzględnia pracę tzw. popychacza obrotowego. Zadaniem popychacza jest wymuszenie przemieszczenia wahadłowego noża (kierunek prostopadły do zasadniczego kierunku przemieszczania się noża).



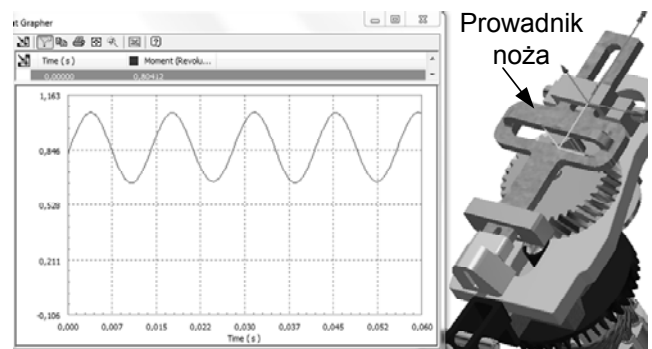
Rys. 7. Przebieg momentu przy uwzględnieniu połączenia W1+W2

Na rysunku 8 pokazano przebieg momentu działającego na wałek silnika przy połączeniu W1+W2+W3. Połączenie W3 uwzględnia pracę elementu inercyjnego w ruchu postępowym. Element ten pełni rolę zasobnika energii kinetycznej, która jest wykorzystywana w odpowiednich fazach ruchu UPN.



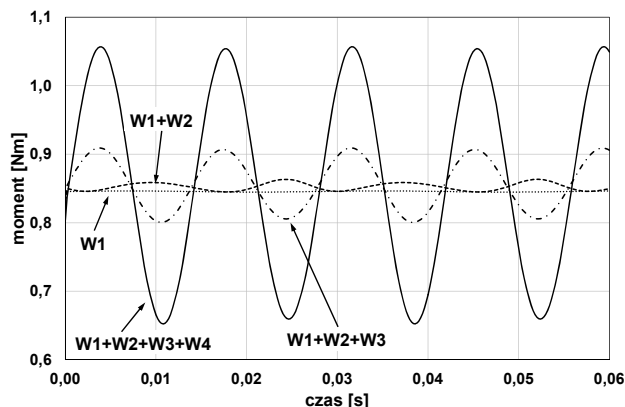
Rys. 8. Przebieg momentu przy uwzględnieniu połączenia W1+W2+W3

Na rysunku 9 pokazano przebieg momentu działającego na wałek silnika przy połączeniu W1+W2+W3+W4. Połączenie W4 uwzględnia pracę tzw. przewodnika noża, który jest elementem inercyjnym w ruchu postępowym. Do dostępnej części końcowej tego elementu przymocowywany jest nóż wyrzynarki.



Rys. 9. Przebieg momentu przy uwzględnieniu połączenia W1+W2+W3+W4

Na rysunku 10 pokazano zestawienie symulacji w celu dokonania porównania wpływu poszczególnych połączeń W1, W2, W3 i W4 na przebieg momentu.



Rys. 10. Przebiegi momentów przy uwzględnieniu połączeń W1, W2, W3 i W4

Wstępna analiza przebiegów momentu pozwala na sformułowanie następujących stwierdzeń: Połączenie W1 charakteryzuje się stosunkowo dużą wartością średniego momentu (około 0,845 Nm) w stosunku do wartości średnich, które wnoszą pozostałe analizowane połączenia. W połączeniu tym uwidacznia się znaczący wpływ tarcia wiskotycznego, zwłaszcza od koła zębatego, które wiruje z prędkością 20000 obr/min. W przebiegu momentu widoczna jest jedna istotna harmoniczna wynikająca z niesymetrycznego rozmieszczenia masy koła zębatego o większej średnicy (walce napędzające pozostałe elementy UPN). Widoczne są także wyższe harmoniczne, ale o stosunkowo niskich amplitudach wynikające ze współpracy zębów przekładni.

Połączenie W2 wnosi dodatkową stosunkowo niewielką wartość średnią do momentu oraz szereg harmonicznych. Harmoniczne te wynikają z tego faktu, że popychacz obrotowy wykonuje tylko ruch wahadłowy, gdzie siła wymuszająca jego obrót działa na zmiennym promieniu.

Połączenie W3 wnosi dodatkową stosunkowo niewielką wartość średnią do momentu oraz jedną istotną harmoniczną. Harmoniczna ta wynika z cyklicznego ruchu postępowego elementu inercyjnego. Wpływ tarcia

wiskotycznego jest stosunkowo niewielki z uwagi na relatywnie małą prędkość względną.

Połączenie W4 wnosi również dodatkową stosunkowo niewielką wartość średnią do momentu oraz jedną harmoniczną o stosunkowo dużej wartości. Harmoniczna ta wynika z cyklicznego ruchu postępowego przewodnika noża. Wpływ tarcia wiskotycznego jest stosunkowo niewielki w porównaniu do połączenia W1.

#### Podsumowanie

Autorzy artykułu stwierdzają, że MSD programu AI może być skutecznym narzędziem do przeprowadzania symulacji dynamicznej skomplikowanych układów mechanicznych do przenoszenia napędu w różnego rodzaju elektronarzędziach. MSD zawiera bibliotekę połączeń, które mogą reprezentować złożony łańcuch kinematyczny zawierający dowolne przemieszczenia obrotowe i postępowe. Niektóre rodzaje połączeń (np. przekładnie mechaniczne) są zdefiniowane w sposób kompletny. Inne wymagają kombinacji kilku elementarnych połączeń.

Analiza łańcucha kinematycznego badanej wyrzynarki STEB 70 wykazała, że połączenie W1 generuje największą składową stałą momentu i nieistotne harmoniczne. W tym połączeniu konstruktor powinien zadbać o odpowiednie ułożyskowanie kół zębatach, gdzie współczynniki tarcia powinny być jak najmniejsze. Pozostałe węzły łańcucha kinematycznego (W2, W3 i W4) nie wnoszą istotnych składowych średnich momentu. Największe harmoniczne momentu generowane są w połączeniach W3 i W4.

Należy niestety stwierdzić, że dokumentacja programu AI ukrywa szczegóły implementacji modelu matematycznego oraz metod numerycznych zaimplementowanych w MSD. Jest to zrozumiałe z praktycznego punktu widzenia inżyniera projektanta, ale z

naukowego punktu widzenia powinno być wiadome jak definiowany jest model matematyczny układu.

MSD zawiera jednak edytor, w którym można definiować wymuszenia (w postaci równań) zależne od wyznaczanych zmiennych w procesie symulacji. To pozwala na budowę modelu matematycznego silnika elektrycznego skojarzonego z badanym procesem symulacyjnym. Autorzy planują w dalszych badaniach opracowanie modelu elektromagnetycznego silnika elektrycznego zaimplementowanego z MSD programu AI.

**Autorzy:** dr hab. inż. Andrzej Wilk, prof. PG, Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, Katedra Energoelektroniki i Maszyn Elektrycznych, ul. Gabriela Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, E-mail: andrzej.wilk@pg.gda.pl; dr inż. Michał Michna, Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, Katedra Energoelektroniki i Maszyn Elektrycznych, ul. Gabriela Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, E-mail: michal.michna@pg.gda.pl.

#### LITERATURA

- [1] Chlebus E.: Techniki komputerowe CAX w inżynierii produkcji. Wydawnictwo WNT, Warszawa, 2000
- [2] Wilk A., Michna M.: Techniki CAD w inżynierii elektrycznej - wybrane zagadnienia, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki, Nr 41, Gdańsk 2015, s. 63-70
- [3] Polakowski K., Sikora J.: Modelowanie siatkowe obiektów płaskich i przestrzennych z wykorzystaniem technik komputerowych, Przegląd Elektrotechniczny, 90 (2014), nr.3, 143-146
- [4] "Autodesk Inventor." [Online]. Available: <http://www.autodesk.pl/products/inventor/overview>. [Accessed: 24-Feb-2015].
- [5] Jaskulski A.: Autodesk Inventor Professional 2015PL/2015+/Fusion/Fusion 360. Wydawnictwo PWN, 2014