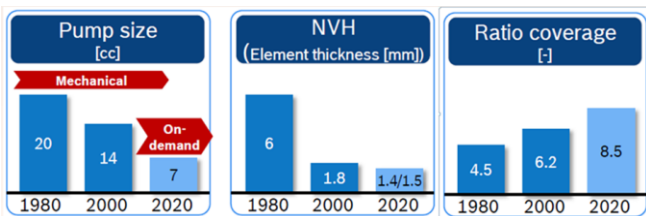




## 1. POPULARNOŚĆ PRZEKŁADNI BEZSTOPNIOWEJ

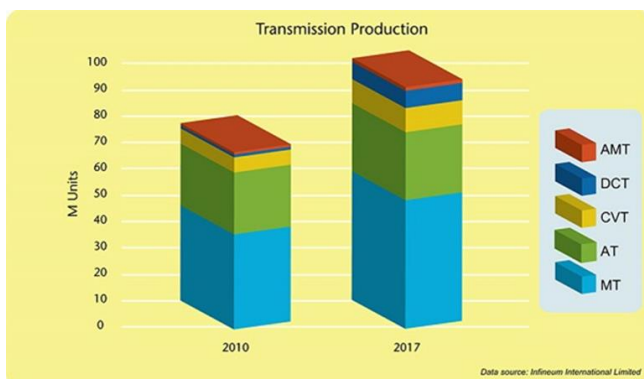
Dzięki lepszemu poznaniu zjawisk zachodzących w tego typu przekładni, rozwojowi inżynierii materiałowej oraz automatyki poczynionemu w ciągu ostatnich dwóch/trzech dekad możliwe stało się przeniesienie przez pas (ang. pushbelt[5]) lub łańcuch momentów obrotowych umożliwiających wykorzystanie osiągnięć obecnych silników spalinowych oraz kontrolowanie połączenia silnik-przekładnia CVT tak, aby zapewnić optymalne warunki pracy tegoż zestawienia. Kryterium optymalizacyjnym może być wartość maksymalnego momentu obrotowego, mocy maksymalnej, najmniejszego jednostkowego zużycia paliwa lub np. najmniejszej emisji szkodliwych substancji.

Nieustannie doskonalenie tego typu przekładni prowadzi do zauważalnych zmian w konstrukcji. Na rys. 3 przedstawiono jak na przestrzeni ostatnich lat, dla rozwiązania z pasem pchanym, zmieniła i będzie zmieniać się objętość jednostkowa pompy, grubość segmentu pasa (im segment ma mniejszą grubość, tym ciszej pracuje wariator) oraz zakres dostępnych przełożeń[7].



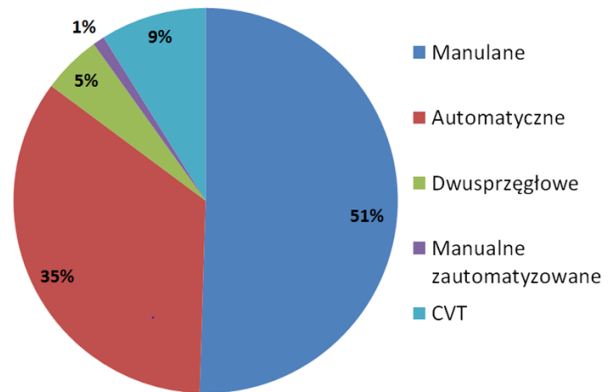
Rys. 3. Zmiana na przestrzeni lat kolejno: objętości jednostkowej pompy, grubości segmentu pasa i zakresu dostępnych przełożeń w przekładniach CVT z pasem pchanym[7]

W wyniku tych osiągnięć nieustannie wzrasta atrakcyjność przekładni bezstopniowych a z nią udział w produkcji automatycznych skrzyń biegów. Zestawienie udziału tego typu przekładni w latach 2010, 2013 oraz 2017 (dane z prognoz) przedstawiono na kolejnych rysunkach.



Rys. 4. Zestawienie udziału poszczególnych typów skrzyń biegów w produkcji światowej[8] AMT- zautomatyzowane manualne skrzynie biegów, DCT- dwusprzęgłowe skrzynie biegów, CVT- bezstopniowe skrzynie biegów, AT- klasyczne automatyczne skrzynie biegów, MT- manualne skrzynie biegów

Udział skrzyń CVT na rynku światowym, montowanych w samochodach osobowych wyniósł około 6% w roku 2010[9], natomiast w roku 2013 już 9% [10] (rys. 5) i zgodnie z rys. 6 oraz 7, przewidywany jest dalszy wzrost popularności. Udział na rynku europejskim według danych Frost&Sullivan w 2012 roku wyniósł około 3,2%.

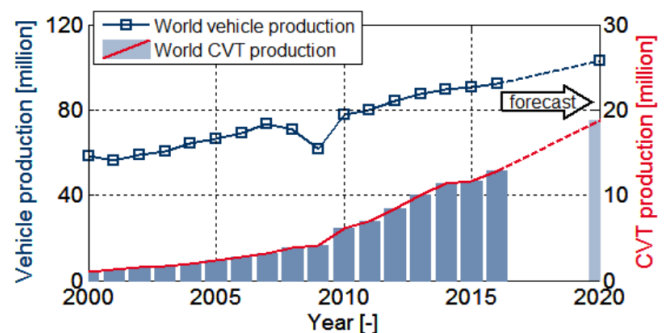


Rys. 5. Podział rynku skrzyń biegów na świecie w 2013 roku. [10]

Wykres 6 przedstawia natomiast światową produkcję skrzyń biegów o bezstopniowej zmianie przełożenia (pomocnicza oś rzędnych) w milionach sztuk w porównaniu ze światową produkcją samochodów podaną również w milionach sztuk.

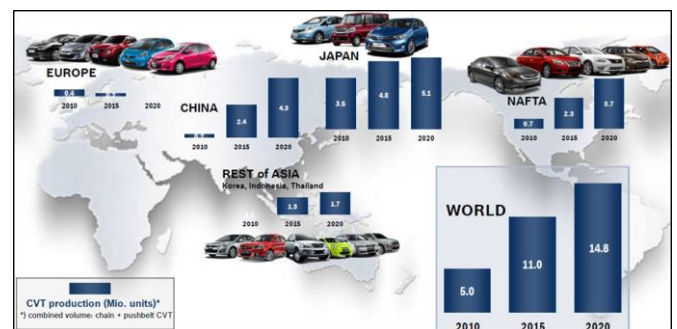
Zauważalny spadek produkcji samochodów w roku 2008 (kryzys) nie spowodował spadku produkcji przekładni CVT. Może się to wiązać z faktem, iż kierowcy poszukiwali pojazdów bardziej ekonomicznych.

Przewiduje się, że w roku 2020 w przybliżeniu co piąty pojazd będzie wyposażony w tego typu przekładnię.



Rys. 6. Światowa produkcja przekładni CVT w porównaniu z produkcją samochodów[11]

Popularność skrzyń biegów o bezstopniowej zmianie przełożenia stosowanych w samochodach osobowych jest zróżnicowana w zależności od rejonu Świata. Rys. 7 przedstawia produkcję przekładni z pasem pchanym lub łańcuchem w milionach sztuk w różnych regionach Świata. Zauważalna rozbieżność między przewidywaną światową produkcją przekładni w roku 2020 między danymi z rys. 6 oraz rys. 7 może wynikać z faktu, iż pochodzą one kolejno z roku 2017 (rys. 6) oraz 2014 (rys.7).



Rys. 7. Produkcja przekładni CVT w zależności od regionu Świata[12]

Analizując dane z rys. 7 zauważyć można, iż tego typu przekładnie na rynku europejskim cieszą się małą popularnością w przeciwieństwie do rynku japońskiego oraz amerykańskiego. Przyczyną tego zjawiska jest m.in. przyzwyczajenie kierowców europejskich, polegające na tym, iż prędkość obrotowa silnika w trakcie intensywnego przyspieszania przechodzi przez pełen zakres użytecznych prędkości obrotowych. Kierowcy w Japonii oraz USA chętniej wybierają pojazdy z przekładniami CVT, gdyż nie odczuwają dyskomfortu związanego z przyspieszaniem pojazdu ze stałą prędkością obrotową silnika. Ponadto w Japonii do stosowania CVT zachęca lokalne prawo[12], a w USA sprzyja duża wartość momentu obrotowego, jakimi dysponują popularne na tamtejszym rynku silniki.

Są jednak typy pojazdów gdzie już teraz można mówić o dużej popularności skrzyni biegów o bezstopniowej zmianie przełożenia- maszyni robocze. Od małych traktorków ogrodowych (kosiarek), przez traktory rolnicze po ciężki sprzęt leśny [13]. Inną grupą pojazdów są motorowery i motocykle, zwane skuterami oraz quady- stosuje się w nich gumowy pas ciągnący.

Niewątpliwą zaletą tego typu przekładni jest umożliwienie zmiany szybkości pojazdu przy zachowaniu stałej prędkości obrotowej silnika, która może byćysterowana w zależności od potrzeb na prędkość obrotową przy której występuje największy moment obrotowy, największa moc, najmniejsze zużycie paliwa bądź najmniejsza emisja substancji szkodliwych do atmosfery.

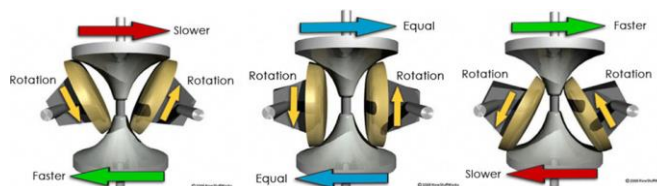
Wzrost sprzedaży tego typu rozwiązania oraz dalszy rozwój techniki powodują, że przekładnie bezstopniowe wciąż są rozwijane. Oprócz wielkich graczy na rynku CVT takich jak Bosch Transmission Technology[5], LuK[14], Jatco[15] czy Punch Powertrain n. v.[16] istnieją mniejsze firmy, specjalizujące się w opracowywaniu nowych technologii dla przekładni bezstopniowej takie jak np. Gear Chain Industrial B.V[17] czy Varibox[18]. Tematyką tą zajmują się również liczne uniwersytety techniczne. Jednym z nich jest Politechnika Łódzka, gdzie opracowano rozwiązanie sterowania hydraulicznego, którego zastosowanie może przynieść znaczącą oszczędność energii[3].

## 2. TYPY PRZEKŁADNI BEZSTOPNIOWYCH

W pojazdach stosuje się następujące przekładnie CVT [4]:

1. Zębate przekładnie CVT (ang. power split CVT), stosowane przede wszystkim w pojazdach hybrydowych, wykorzystujące przekładnie planetarne do realizacji zmian przełożenia.
2. Hydrauliczne przekładnie CVT (napędy hydrostatyczne) składające się z pompy hydraulicznej o zmiennej regulowanej wydajności, silnika hydraulicznego oraz rozdzielaczy. Przekładnie te nie znalazły szerszego zastosowania w pojazdach samochodowych ze względu na koszty, wymiary, niską sprawność w dużym zakresie przełożeń, oraz problemy ze znaczną ilością wydzielanego ciepła. Są one stosowane przede wszystkim w maszynach roboczych.
3. Hydrodynamiczne przekładnie, to przekładnie w których następuje zamiana doprowadzonej energii na energię kinetyczną cieczy, a następnie energia kinetyczna cieczy zostaje zamieniona na energię odbieraną na wale napędzanym. Przekładnie te składają się co najmniej z trzech elementów, a mianowicie z pompy, turbiny i kierownicy. Wartość maksymalnego przełożenia dynamicznego (współczynnik transformacji) wynosi nie więcej niż  $2 \div 2,5$ , co tłumaczy się niską sprawnością dla większych wartości przełożeń. Cecha ta powoduje konieczność stosowania w układach napędowych pojazdów dodatkowych przekładni mechanicznych.

4. Przekładnie toroidalne przenoszące moment napędowy między tarczą napędzającą a tarczą napędzaną przez zastosowanie rolek pośredniczących współpracujących z dyskami na różnych promieniach- rys.8. Ze względu na problemy technologiczne dopiero w ostatnich latach nastąpił znaczący rozwój tych przekładni i ich zastosowań w pojazdach samochodowych.



Rys. 8. Zasada działania przekładni toroidalnej [19].

5. Przekładnie cięgnowe:

### a) pasowe

- przekładnie „mokre”, w których moment obrotowy jest przenoszony między powierzchniami kół stożkowych a elementami pasów stalowych zwilżanych olejem;
- przekładnie „suche” wykorzystujące siły tarcia suchego między kołami stożkowymi a pasem gumowym o kształcie V. Przekładnie tego typu są najbardziej rozpowszechnione w mikrosamochodach, skuterach i pojazdach śnieżnych;
- przekładnie z pasem hybrydowym, segmentowym z segmentami wykonanymi z aluminium pokrytego gumą (ang. dry hybrid belt);

### b) łańcuchowe

- przekładnie „mokre”, w których zamiast stalowego pasa pchanego zastosowanego łańcuch, smarowany olejem hydraulicznym;

Obecnie w samochodach osobowych spośród rozwiązań wymienionych powyżej zdecydowanie najbardziej popularne są przekładnie mokre cięgnowe pasowe z pasem pchanym (ang. pushbelt) lub łańcuchem. Rys. 9 przedstawia schemat rozwiązania z pasem pchanym, rysunek 10 schemat samego pasa pchanego, natomiast łańcuch przedstawiony jest na rys. 11.

Przekładnia taka składa się z dwóch par krążków o zarysie stożkowym, które tworzą koła pasowe o zmieniającej się średnicy. W każdej parze jeden z krążków jest nieruchomy, natomiast położenie drugiego jest regulowane- przesuwanie wzdłuż osi obrotu (co powoduje zsuwanie/rozsuwanie się par krążków). Sterowanie ruchomymi krążkami pozwala na zmianę promieni na jakich pracuje pas, czyli w efekcie na zmianę przełożenia. Sterowanie ich ruchem odbywa się przede wszystkim za pomocą siłowników hydraulicznych, sterowanych blokiem elektrozaworowym przekładni CVT, a zasilanych pompą hydrauliczną. Prowadzone są jednak prace nad innymi rozwiązaniami przesuwu osiowego krążków, mającymi w sposób znaczący ograniczyć energochłonność układu sterowania- sterowanie elektrohydrauliczne-[3] czy też elektromechaniczne-[20]. Przesuw krążków jest bezstopniowy, czyli zmiana przełożenia również odbywa się w sposób płynny/bezstopniowy.

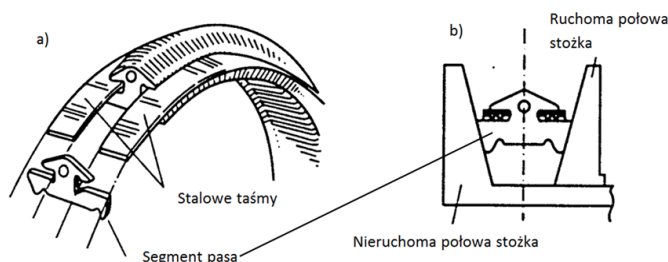


Rys. 9. Zasada pracy przekładni CVT z pasem pchanym[21].



[4] Pas tego typu przekładni składa się z 300-400 stalowych segmentów (rys. 10) powiązanych przesuwnie zespołem stalowych taśm (0,2mm do 0,4mm). Cienkie taśmy stalowe wchodzą w odpowiednie wycięcia segmentów. Segmenty nie mogą przemieszczać w sposób dowolny względem siebie, ponieważ każdy z nich posiada występ, który wchodzi w otwór poprzedzającego go elementu. Każdy z segmentów jest zbieżny ku osi obrotu koła pasowego. Umożliwia to prawidłowy kontakt w czasie ruchu elementu po obwodzie - przeniesienie siły napędowej następuje głównie przez pchanie.

Budowa i zasada działania przekładni z łańcuchem jest niemal identyczna, z tym, że łańcuch napędza przekładnię poprzez ciągnięcie - rys. 11.



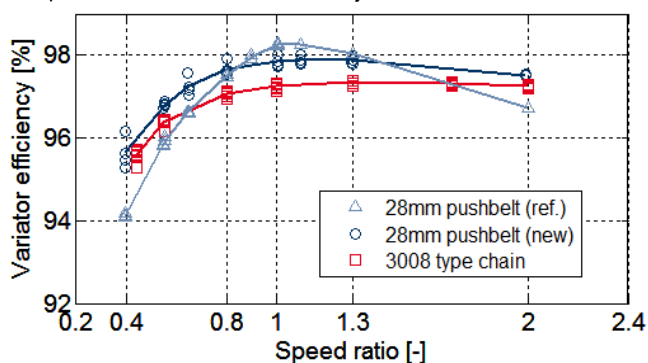
**Rys. 10.** Pas stalowy pchany przekładni CVT [22].



**Rys. 11.** Łańcuch przekładni CVT [23]

Na rys. 12 przedstawiono sprawność wariatora przekładni bezstopniowej w funkcji przełożenia (prędkości) z pasem pchanym firmy BOSCH obecnej konstrukcji, planowanym do wdrożenia oraz łańcuchem firmy LuK według [11].

Jak można stwierdzić na podstawie wspomnianego wykresu, najwyższą sprawność rzędu 98% wariator uzyskuje w pobliżu przełożenia jeden. M. in. z tego powodu konstruktorzy popularnej skrzyni biegów firmy Jatco, model CVT7, zastosowali dodatkową przekładnię dwu-biegową (plus bieg wsteczny) typu Ravigneaux aby przełączając pomiędzy biegiem pierwszym a drugim, utrzymywać przełożenie przekładni CVT możliwie blisko jedności.



**Rys. 12.** Sprawność wariatora z pasem pchanym obecnej konstrukcji(ref.), nowej-planowanej do wdrożenia (new) oraz łańcuchem (chain)[11]

### 3. WYZWANIA TECHNICZNE ZWIĄZANE Z PRZEKŁADNIAMI CVT

Przekładnie typu CVT nie są tak popularne jak tradycyjne, stopniowe skrzynie biegów m.in. ze względu na skomplikowane sterowanie, które musi zapewnić odpowiednio duże wartości ciśnień na obu siłownikach przekładni w celu wypracowania żądanej wartości przełożenia bez ryzyka wystąpienia zjawiska poślizgu pasa. Aktualna wartość przełożenia jest silnie zakłócana przez moment obrotowy oraz temperaturę. Mowa tu nie tylko o średniej temperaturze oleju w skrzyni biegów, ale również o lokalnych wahanach temperatur na podzespołach takich jak elektrozawory[24], hydrauliczny blok sterujący[25] czy pompa zasilająca[26] na których dochodzi do zakłóceń sygnału zadawanego przez sterownik (straty ciśnienia, przecieki, zmiana temperatury cewki elektrozaworu a co za tym idzie rezystancji i siły cewki).

W wyniku tych zakłóceń nie jest możliwe zadawanie przez sterownik sygnałów, pozwalających na wypracowanie bieżących wartości ciśnień w czasie ruchu pojazdu, znajdujących się bezpośrednio nad graniczną wartością wystąpienia poślizgu pasa. W związku z tym, stosuje się pewien nadmiar ciśnienia napinającego pas (współczynnik bezpieczeństwa), obniżającego sprawność przekładni. Nieustannym działaniem inżynierów jest zmniejszanie tego współczynnika bezpieczeństwa, poprzez doskonalenie układu sterowania, a w efekcie zwiększanie sprawności przekładni.

Złożonym problemem jest zjawisko tarcia występujące pomiędzy kołami pasowymi a pasem pchanym (łańcuchem). Przemieszczeniu promieniowemu segmentów pasa przekładni przy zmianie przełożenia towarzyszy zjawisko tarcia, podobnie jak ruchowi obwodowemu. W złożonym stanie obciążenia, zmieniającym się dynamicznie i przy występowaniu zjawiska histerezy nie ma obecnie możliwości wyznaczenia składowej siły tarcia pomagającej utrzymać napięcie pasa a tym samym dokładnej wartości siły niezbędnej do napięcia pasa. Ta niedokładność przyczynia się do zastosowania znacznego współczynnika bezpieczeństwa, powodującego dalsze zwiększenie siły napinającej pas a w rezultacie zmniejszającej sprawność przekładni. Składają się na to również kwestie związane z trudnością z precyzyjnym określeniem samego współczynnika tarcia oraz faktem, iż koła pasowe ulegają pewnym odkształceniom. Obecnie trwają prace nad pomiarem wartości (mikro)-poślizgu w przekładniach CVT w czasie rzeczywistym w celu optymalizacji wartości siły napinającej pas.

Kolejną aktualną kwestią są odczucia kierowcy w trakcie poruszania się pojazdem wyposażonym w tego typu przekładnię. Sterowanie elektroniczne w pojazdach obejmuje kontrolę już nie tylko nad samą skrzynią biegów ale nad całym układem napędowym. Dzięki temu steruje się jednocześnie parametrami skrzyni biegów i silnika uzyskując np. pozbawione szarpnięć bądź znacznych opóźnień przyspieszanie. Możliwe jest dziś również wybieranie z zakresu rozpiętości przełożeń przekładni bezstopniowej, wcześniej zaprogramowanych wartości przełożeń, co pozwala kierowcom na jazdę w trybie przypominającym użycie konwencjonalnej, manualnej skrzyni biegów.

Rosnące wymagania kierowców związane z komfortem podróży nie ograniczają się dziś tylko do własności jezdnych pojazdu. Coraz większą uwagę producenci samochodów muszą przywiązywać do tzw. tematyki NVH (ang. Noise, Vibration and Harshness), oznaczającej kolejno hałas, wibracje i (dość) szorstkość. Osłabienie wpływu tych niekorzystnych czynników jest minimalizowane przez zmniejszanie grubości segmentu pasa (rys. 3).

## PODSUMOWANIE

Przekładnie o bezstopniowej zmianie przełożenia, w przeciwieństwie do konwencjonalnych rozwiązań umożliwiając lepsze wykorzystanie charakterystyki silnika spalinowego. Ta niepodważalna zaleta stanowi o tym, iż wykorzystując rozwój techniki producenci pojazdów samochodowych sięgnęli do idei sprzed lat.

Przedstawione dane o produkcji skrzyń bezstopniowych sugerują, iż popularność tego typu rozwiązania będzie rosła. Sprzyja temu wyraźny w ostatnich latach postęp w zakresie sprawności, dynamiki i komfortu przekładni CVT. Dodatkowymi czynnikami wspierającymi wzrost zainteresowania kierowców są rosnące ceny paliw oraz coraz bardziej restrykcyjne normy emisji substancji szkodliwych.

## BIBLIOGRAFIA

1. Goszczak J., Przekładnie o bezstopniowej zmianie przełożenia- charakterystyka i zastosowanie, Zagadnienia aktualnie poruszane przez młodych naukowców 5. Kraków 2016. s. 439-443.
2. www.popularmechanics.com. Dostęp 01.2017: <http://www.popularmechanics.com/cars/a7243/gears-galore-how-many-speeds-is-too-many/>
3. Goszczak J., Radzyński B., Propozycja układu hydraulicznego zasilającego przekładnię CVT. Przegląd Mechaniczny. Nr 7-8 2017. s. 23-38.
4. Grzegożek W., Przekładnie o ciągłej zmianie przełożenia (CVT) w układach napędowych pojazdów. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej. Kraków 2011.
5. Bosch Transmission Technology. Dostęp 06.2017: [http://www.bosch.nl/transmission\\_technology/en/html/5835.htm](http://www.bosch.nl/transmission_technology/en/html/5835.htm)
6. www.rokemneedlearths.com. Dostęp 07.2016: <http://www.rokemneedlearths.com/carsindepth/wordpressblog/?p=12868>
7. Bosch Transmission Technology. 2. VDI Wissenforum- CVT in automotive applications. 10-11.10.2017. Eindhoven.
8. Infineum International Limited. Dostęp 06.2017: <http://www.infineuminsight.com/insight/dec-2012/gearing-up>
9. www.vdoleje.com. Dostęp 05.2016: [http://www.vdoleje.pl/31-76-synpower-cvt\\_systems/products\\_transmission\\_systems/automatic\\_transmissions/automatic\\_transmissions.jsp](http://www.vdoleje.pl/31-76-synpower-cvt_systems/products_transmission_systems/automatic_transmissions/automatic_transmissions.jsp)
10. Schaeffler. Dostęp 01.2016: [http://www.schaeffler.de/content.schaeffler.de/de/branches/automotive\\_division/transmission](http://www.schaeffler.de/content.schaeffler.de/de/branches/automotive_division/transmission)
11. Sluis F., Yildiz S., Brandsma A. Veltmans P., Kunze M., The CVT Pushbelt reinvented for Future Compact and Efficient Powertrains. Conference Paper. May 2017. Conference: JSAE 2017. Yokohama – Japan.
12. BOSCH. FISITA World Automotive Congress 2014.
13. www.farmer.com Dostęp 06.2017: <http://www.farmer.pl/technika-rolnicza/maszyny-rolnicze/cvt-coraz-bardziej-popularny,52741.html>
14. LuK. Dostęp 06.2017: [http://www.luk.de/content.luk.de/en/products/transmission\\_components/cvt/CVT.jsp](http://www.luk.de/content.luk.de/en/products/transmission_components/cvt/CVT.jsp)
15. Jatco. Dostęp 06.2017: <https://www.jatco.co.jp/english/>
16. Punch Powertrain n v. Dostęp 11.2017: <http://www.punchpowertrain.com/>

17. Gear Chain Industrial B.V. Dostęp 06.2017: <http://www.gcinet.nl/en/technology/control-systems>
18. Varibox. Dostęp 07.2017: <http://www.varibox.com/>
19. auto.howstuffworks.com. Dostęp 05.2016: <http://auto.howstuffworks.com/cvt3.htm>
20. Klaassen T.W.G.L. The impact CVT: dynamics and control of an electromechanically actuated CVT. Technische Universiteit Eindhoven. Eindhoven 2007.
21. www.superstreetonline.com Dostęp 02.2016: <http://image.com/f/69633342+w+h+q80+re0+cr1+ar0+st0/continuously-variable-transmissions-nissan-xtronic-cvt-03.jpg>
22. Markus H. Hanes. Dostęp 01.2018: [http://spline.mae.wvu.edu/Reseach\\_Projects/HANSES/A2.html](http://spline.mae.wvu.edu/Reseach_Projects/HANSES/A2.html)
23. www.autos.com. Dostęp 01.2018: <http://www.autos.ca/wp-content/uploads/2015/04/21-Subaru-CVT-Chain.jpg>
24. Goszczak J., Radzyński B., Werner A., Pawelski Z., Elektrozawory hydrauliczne sterowane sygnałem PWM stosowane w pojazdach samochodowych, Archiwum Motoryzacji/ The Archives of Automotive Engineering. Nr 1/2017, Vol. 75, s. 23-37.
25. Radzyński B., Goszczak J., Wypracowanie ciśnień do sterowania przełożeniem bezstopniowej przekładni samochodowej, Archiwum Motoryzacji/ The Archives of Automotive Engineering. Nr 4/2016, Vol. 74, s. 95-104.
26. Goszczak J., Werner A., Gauthier P., Pawelski Z., Hydraulika i Pneumatyka. Model i badania układu ograniczającego wydajność pompy waporowej o stałej objętości jednostkowej. Nr 3/2015. s. 5-9.

## PODZIĘKOWANIA

Autorzy niniejszego artykułu pragną serdecznie podziękować Panu doc. dr. inż. Andrzejowi Wernerowi za nieocenioną pomoc w trakcie przygotowywania niniejszego artykułu.

### Continuously Variable Transmissions - outline

*Paper concerned the Continuously Variable Transmission (CVT). The comparison of the engine's work conditions with conventional manual transmission and CVT's is presented. Also, a short historical track is included. Furthermore, a production data with the forecast is presented for different parts of the World. Various current solutions of continuous ratio change are mentioned with the more detailed description of the most popular design used in passenger cars. Technological challenges and possibilities of further transmission improvement are included.*

Autorzy:

mgr inż. **Jarosław Goszczak** – Politechnika Łódzka, Katedra Pojazdów i Podstaw Budowy Maszyn, [jaroslaw.goszczak@p.lodz.pl](mailto:jaroslaw.goszczak@p.lodz.pl)

mgr inż. **Bartosz Radzyński** – Politechnika Łódzka, Katedra Pojazdów i Podstaw Budowy Maszyn, [bartosz.radzynski@p.lodz.pl](mailto:bartosz.radzynski@p.lodz.pl)

**JEL:** L62 **DOI:** 10.24136/atest.2018.110

**Data zgłoszenia:** 2018.05.23 **Data akceptacji:** 2018.06.15