

Układy zasilania silników spalinowych eksploatowanych w kopalniach węgla kamiennego na przykładzie rozwiązań ITG KOMAG

dr inż. Piotr Dobrzaniecki
dr inż. Krzysztof Kaczmarczyk
Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Streszczenie:

Silniki spalinowe z zapłonem samoczynnym są stosowane w kopalniach węgla kamiennego do napędu maszyn transportowych. Wzrastające wymagania dotyczące poprawy jakości spalin przyczyniły się do rozwoju systemów zasilania silnika. W efekcie zmniejszono zużycie paliwa, zwiększono moc przy jednoczesnym zmniejszeniu masy własnej silnika. W niniejszym artykule przedstawiono przegląd oraz ewolucję systemów zasilania przeznaczonych do silników z zapłonem samoczynnym, uwzględniając jednocześnie problemy eksploatacyjne związane z ich użytkowaniem w podziemnych wyrobiskach węgla kamiennego.

Słowa kluczowe: silnik wysokoprężny, pompa wtryskowa, wtryskiwacz, pompa rozdzielaczowa, napęd spalinowy, układ common rail

Keywords: diesel engine, injection pump, injector, distribution pump, combustion drive, common rail system

Abstract:

Engines with compression ignition are being used in coal mines for driving of transport machinery. Increasing requirements concerning quality of exhaust gases caused development of engine power supply systems. As a result, fuel consumption was reduced, power was increased while the weight of the engine was reduced. This article provides an overview and evolution of power systems for compression ignition engines and operational problems related to their use in underground hard coal workings.

1. Wstęp

Napęd spalinowy, oparty o silnik wysokoprężny, jest wykorzystywany w górniczych maszynach roboczych od 1927 roku, kiedy to po raz pierwszy użyto go w niemieckich kopalniach rudy żelaza. W polskim górnictwie rudnym maszyny samojezdne zostały wprowadzone w 1968 roku [9]. Postęp techniczny jaki miał miejsce w konstrukcji silników wysokoprężnych znajduje swoje odbicie również w konstrukcji górniczych napędów spalinowych, w których wprowadzano coraz to nowsze rozwiązania oferowane przez producentów silników. Rozwój w dziedzinie konstrukcji silników spalinowych dotyczy w szczególności układów zasilania oraz układów sterowania silnikiem. Najnowocześniejsze układy zasilania silnika do swojej pracy wymagają złożonego sterowania mikroprocesorowego. Dzięki zastosowaniu sterownika, silnik osiąga bardzo dobre parametry użytkowe, zarówno w kwestii mocy, momentu obrotowego, jak i emisji spalin, w których została ograniczona ilość substancji szkodliwych obecnych w spalinach. Poniżej przedstawiono ewolucję układów zasilania silników wraz z przykładowymi aplikacjami.

2. Silnik wysokoprężny

Prototyp silnika z zapłonem samoczynnym powstał w roku 1893, natomiast pierwszy w pełni udany silnik wysokoprężny został zbudowany w roku 1897 przez Rudolfa Diesla pracującego wówczas w zakładach MAN AG w Augsburgu [13]. W stosunku do swego protoplasty współczesny silnik wysokoprężny ulegał licznym modyfikacjom, nie zmieniła się jednak jego podstawowa cecha, polegająca na samoczynnym zapłonie paliwa bez udziału pomocniczych urządzeń zapłonowych.

Układ zasilający, stanowi jeden z najważniejszych zespołów silnika. Jego główne elementy to:

- pompa zasilająca,
- filtr paliwa,
- pompa wtryskowa (wysokiego ciśnienia),
- przewody wysokiego ciśnienia,
- wtryskiwacze.

Z tych elementów największe zmiany dotyczyły pompy wysokiego ciśnienia oraz wtryskiwaczy, co w efekcie spowodowało wzrost ogólnej sprawności silnika. Za wskaźnik sprawności silnika spalinowego można uznać wysoką zawartość tlenków azotu w spalinach, która informuje o wysokiej temperaturze spalania mieszanki paliwowo-powietrznej, co pozwala osiągnąć wysokie wartości ciśnienia w cylindrze, a w efekcie duże wartości sił działających na tłok. Widać więc, że wzrost sprawności silnika skutkuje wzrostem ilości związków azotu w spalinach. Za eliminację szkodliwych substancji ze spalin w dużej mierze odpowiadają dodatkowe urządzenia w układzie wylotowym.

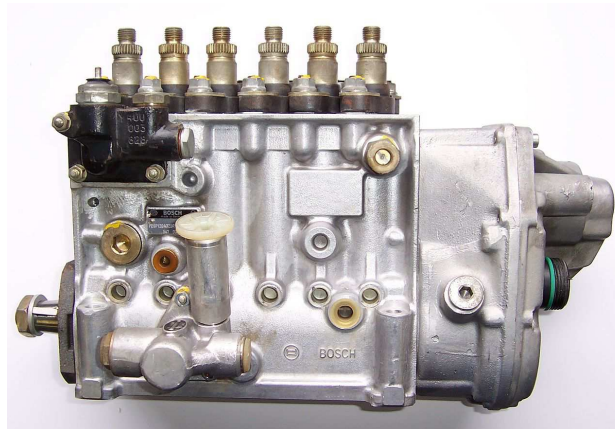
3. Podział układów zasilających silników wysokoprężnych

Rozwój układów wtryskowych do silników wysokoprężnych spowodował powstanie nowych rozwiązań oraz doskonalenie istniejących konstrukcji np. pomp wtryskowych lub wtryskiwaczy. Przykładowo, pierwsza seryjna rzędowa pompa wtryskowa powstała w 1927 roku, natomiast pierwsza osiowa rozdzielaczowa pompa wtryskowa typu EP-VM w 1962 roku [2]. Z biegiem lat opracowywano coraz doskonalsze rozwiązania techniczne.

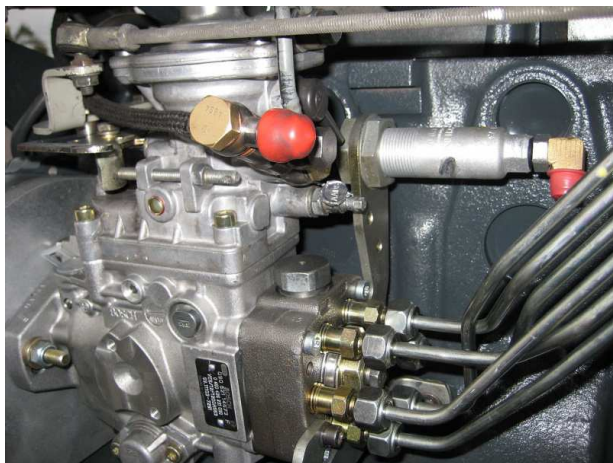
Można wyróżnić następujące układy zasilania silników wysokoprężnych z:

- rzędową (sekcyjną) pompą wtryskową (rys. 1),
- rozdzielaczową pompą wtryskową (rys. 2),
- rozdzielaczową pompą wtryskową regulowaną elektronicznie (rys. 3),
- układem typu UIS (ang. unit injector system) – pompowtryskiwacze (rys. 4),
- układem typu UPS (ang. unit pump system) – pompa-przewód-wtryskiwacz (rys. 5),
- zasobnikowym układem wtryskowym (ang. common rail) (rys. 6).

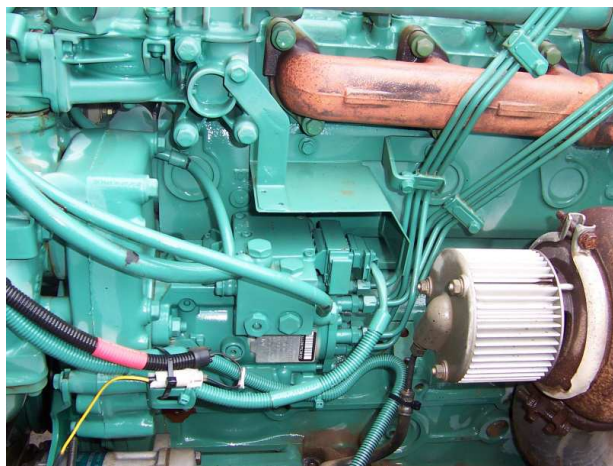
Przykłady wybranych rozwiązań głównych zespołów wymienionych powyżej przedstawiono na rysunkach poniżej.



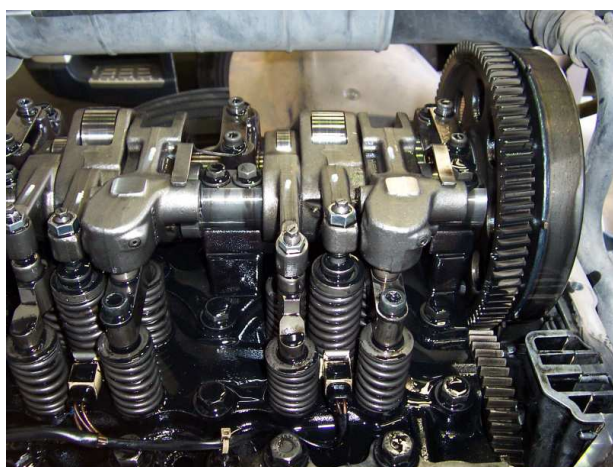
Rys. 1. Rzędowa pompa wtryskowa [14]



Rys. 2. Rozdzielaczowa pompa wtryskowa [15]



Rys. 3. Rozdzielaczowa pompa wtryskowa sterowana elektronicznie [15]



Rys. 4. Układ UIS – pompowtryskiwacze [17]



Rys. 5. Układ UPS – pompa-przewód-wtryskiwacz [11]



Rys. 6. Układ common rail [16]

4. Przykłady zastosowania silników wysokoprężnych w górniczych maszynach roboczych

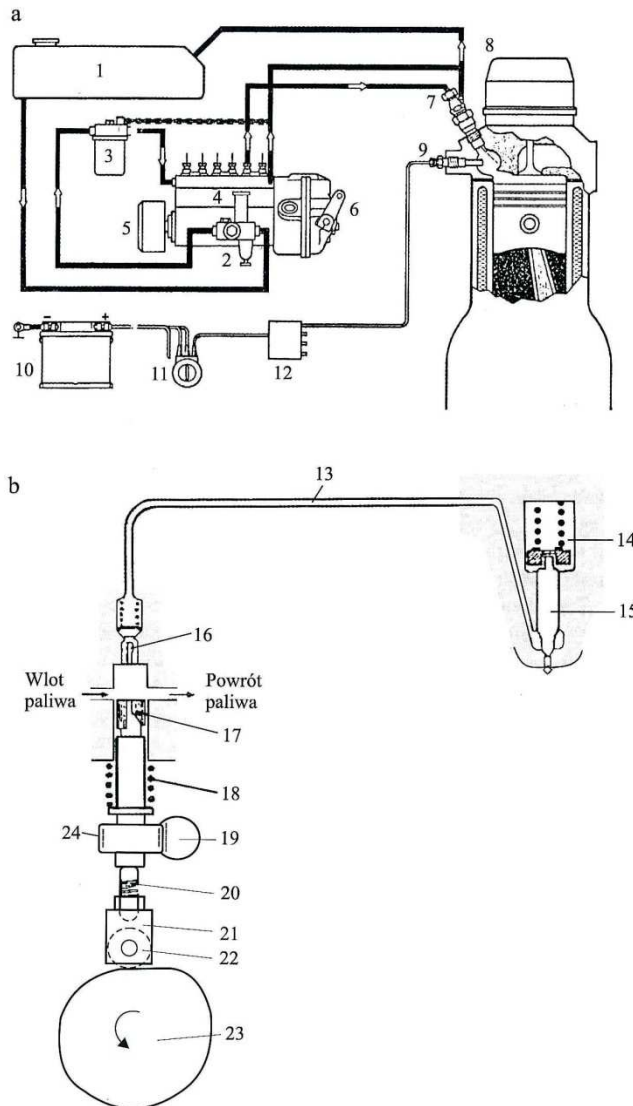
W maszynach transportowych eksploatowanych w polskich kopalniach węgla kamiennego zastosowano m.in. niżej wymienione silniki:

- SW400 produkcji Andoria,
- 4CT107 produkcji Andoria,
- D916 produkcji MWM Mannheim,
- BF4M1013 produkcji Deutz,
- 4BTAA 3.9 produkcji Cummins,
- 4045HF285 produkcji John Deere.

Wyżej wymienione silniki wyposażono w większość z opisywanych wcześniej układów zasilających. Poniżej omówiono jednostki napędowe wraz z przykładami zastosowania.

4.1 Rzędowa (sekcyjna) pompa wtryskowa

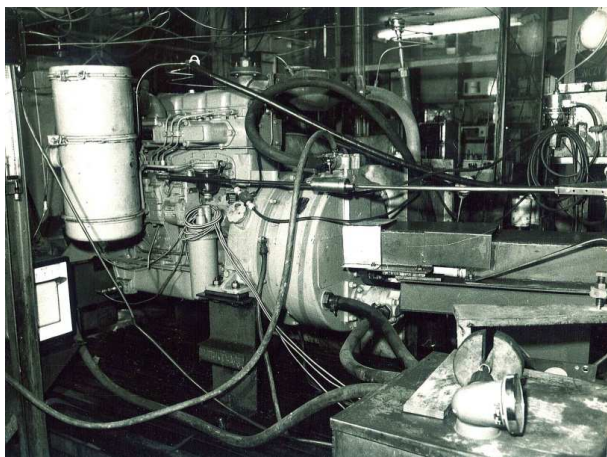
Rzędowe pompy wtryskowe (rys. 7) mają odrębną dla każdego cylindra parę precyzyjną składającą się z cylinderka i tłoczka. Tłoczek jest poruszany przez wbudowany w pompę i napędzany od silnika wałek krzywkowy w kierunku tłoczenia, a cofany przez sprężynę powrotną. Skośna krawędź sterująca w górnej części tłoczka obracanego listwą zębatą pompy umożliwia zmianę skoku tłoczka i dawki paliwa [6].



Rys. 7. Układ zasilania wtryskowego silnika ZS z rzędowną pompą wtryskową oraz schemat regulacji pompy rzędownej [6]

- 1 – zbiornik paliwa, 2 – pompa paliwa, 3 – filtr paliwa, 4 – rzędowna pompa wtryskowa, 5 – znacznik czasu, 6 – regulator obrotów, 7 – wtryskiwacz, 8 – przewód powrotny, 9 – świeca żarowa, 10 – akumulator, 11 – włącznik świecy żarowej, 12 – regulator świecy żarowej, 13 – przewód wtryskowy, 14 – sprężyna wtryskiwacza, 15 – iglica, 16 – zawór odcinający, 17 – tłoczek, 18 – sprężyna powrotna, 19 – listwa zębata, 20 – regulacja wyprzedzenia wtrysku, 21 – popychacz, 22 – rolka, 23 – wałek krzywkowy pompy wtryskowej, 24 – wycinek koła zębatego

Przykładem silnika, w którym zastosowano rzędowną pompę wtryskową jest silnik SW 400 (rys. 8). Jest to jednostka sześciocyliindrowa z wtryskiem bezpośrednim. Silnik był produkowany przez Wytwórnę Silników Wysokoprężnych Andoria w Andrychowie na podstawie umowy licencyjnej z firmą British Leyland i służył do napędu lokomotywy typu Lds-100 (rys. 9).



Rys. 8. Silnik SW 400 podczas testów napędu spalinowego [7]



Rys. 9. Lokomotywa Lds-100 wyposażona w silnik SW 400 [11]

Kolejnym przykładem jest silnik 4CT107 (rys. 10). Jest to jednostka czterocyliindrowa z wtryskiem bezpośrednim, z rzędowną pompą wtryskową. Silnik był produkowany przez Wytwórnę Silników Wysokoprężnych Andoria i służył do napędu lokomotywy typu WLP-50EM (rys. 11).

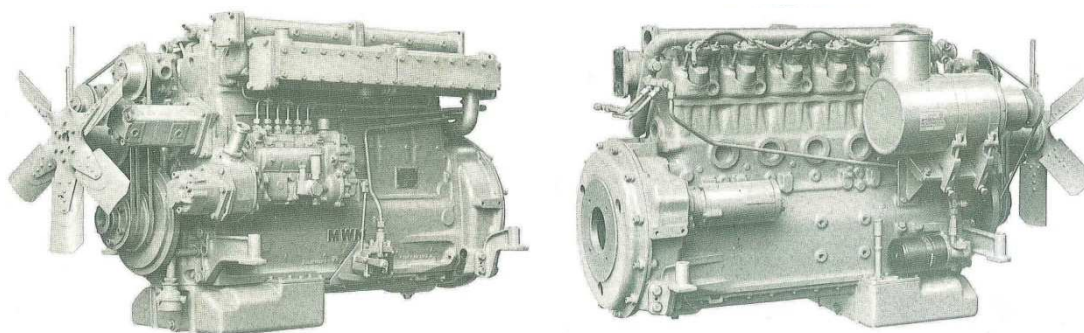


Rys. 10. Silnik 4CT107 [11]



Rys. 11. Lokomotywa WLP-50EM napędzana silnikiem 4CT107 [11]

Silnik D916 (rys. 12) to jednostka sześciocylindrowa, także wyposażona w rzędową pompę wtryskową. Silnik był produkowany przez firmę MWM Mannheim, przejętą później przez firmę Deutz. Został zastosowany m.in. do napędu lokomotywy typu Lds-100M, lokomotywy podwieszanej typu LPS-90 oraz wozu odstawczego WOS-10.

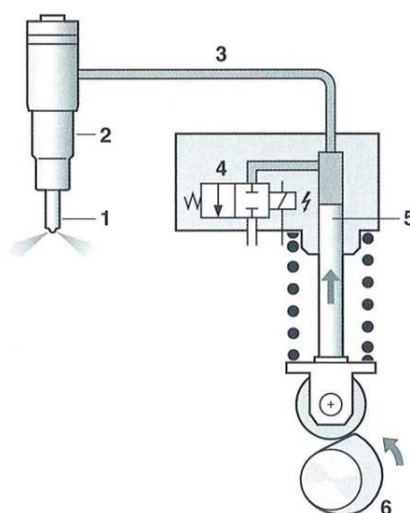


Rys. 12. Silnik D916-6 [12]

4.2 Układ zasilający typu UPS (pompa-przewód-wtryskiwacz)

Układy typu UPS lub UIS, należące do grupy indywidualnych zespołów wtryskowych, nie mają własnego wałka krzywkowego. Podstawowa zasada ich działania jest taka sama, jak rzędowych pomp wtryskowych. W silnikach dużej mocy regulator mechaniczno-hydrauliczny (lub elektroniczny) znajduje się bezpośrednio na kadłubie silnika. Wielkość dawki ustalona przez regulator jest realizowana za pomocą układu cięgnowego. Krzywki napędowe poszczególnych zespołów wtryskowych znajdują się na wale rozrządu [6]. Ze względu na brak przewodów wysokiego ciśnienia w układach UIS możliwe jest osiągnięcie wysokich wartości ciśnienia wtrysku, dochodzących do 220 MPa. Wady układów UIS to znaczne obciążenie głowicy oraz wałka rozrządu w uwagi na obecność popychacza dźwigniowego, ograniczona liczba podziału procesu wtrysku oraz rozbudowana górna część silnika. W stosunku do układów UIS układy UPS posiadają następujące zalety: nie wymagają zmian w konstrukcji głowicy silnika, napęd jest sztywny, ponieważ nie występuje popychacz dźwigniowy. Ponadto obsługa w trakcie przeglądów jest ułatwiona ze względu na łatwy demontaż pomp sekcyjnych [2].

Układ UPS stosowany jest powszechnie w silnikach wielocylindrowych, gdzie ze względu na dużą odległość pompy od ostatniego wtryskiwacza występować mogą różnice parametrów zasilania poszczególnych wtryskiwaczy (opory hydrauliczne). Schemat układu UPS przedstawiono na rysunku 13.



Rys. 13. System zasilający UPS (ang. *unit-pump-system*) [2]

1 – rozpylacz, 2 – wtryskiwacz, 3 – przewód wysokiego ciśnienia,
4 – elektromagnetyczny zawór wysokiego ciśnienia, 5 – tłoczek pompy, 6 – krzywka napędzająca

Silnik Volvo-Penta D5A T (lub bliźniacza konstrukcja Deutz BF4M1013) (rys. 14) to jednostka czterocylindrowa z układem zasilającym typu UPS. Silnik jest stosowany do napędu lokomotywy typu Lds-100K-EMA (rys. 15).



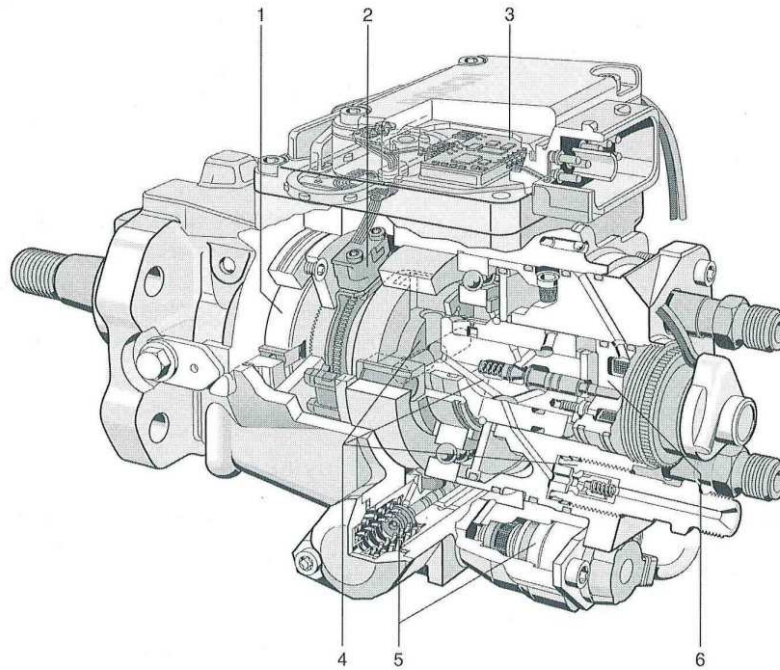
Rys. 14. Silnik Deutz D5A T (widok pomp jednosekcyjnych i przewodów wysokociśnieniowych) [11]



Rys. 15. Lokomotywa Lds-100K-EMA w podziemnym wyrobisku górniczym [11]

4.3 Układ zasilający z pompą rozdzielaczą

Rozdzielaczowe pompy wtryskowe (rys. 16) mają mechaniczny regulator prędkości obrotowej lub regulator elektroniczny z wbudowanym przestawiaczem wtrysku. Mają tylko jedną parę precyzyjną, wytwarzającą wysokie ciśnienie dla wszystkich cylindrów [6]. W stosunku do pomp sekcyjnych pompy rozdzielaczowe pozwalają osiągnąć wyższe wartości ciśnienia wtrysku co polepsza jakość procesu spalania. Ponadto pozwalają na stosowanie podziału procesu wtrysku przy zastosowaniu sterownika.



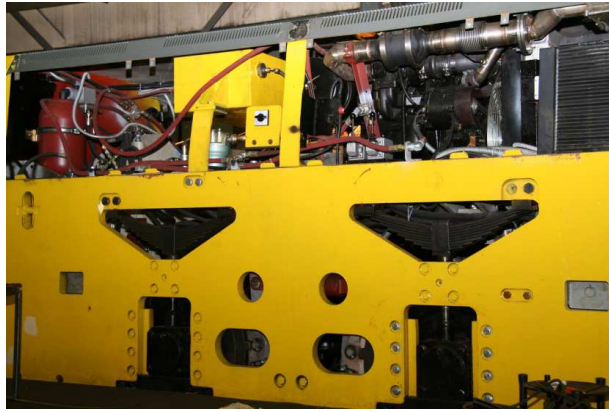
Rys. 16. Rozdzielaczowa pompa wtryskowa – podstawowe zespoły [1]

1 – łopatkowa pompa przetłaczająca z zaworem regulacyjnym ciśnienia, 2 – czujnik kąta obrotu, 3 – sterownik pompy, 4 – pompa wysokiego ciśnienia z wałkiem rozdzielczym i zaworem wylotowym (zawór ciśnieniowy), 5 – przestawiacz wtrysku z zaworem przestawiacza, 6 – zawór elektromagnetyczny wysokiego ciśnienia

Przykładem konstrukcji, w której wykorzystano rozdzielaczową pompę wtryskową jest silnik 4BTAA 3.9 (rys. 17). Jest to jednostka czterocylindrowa, produkowana przez firmę Cummins, którą zastosowano do napędu lokomotywy typu Lds-100K-EM oraz WLP-50EM (rys. 18).



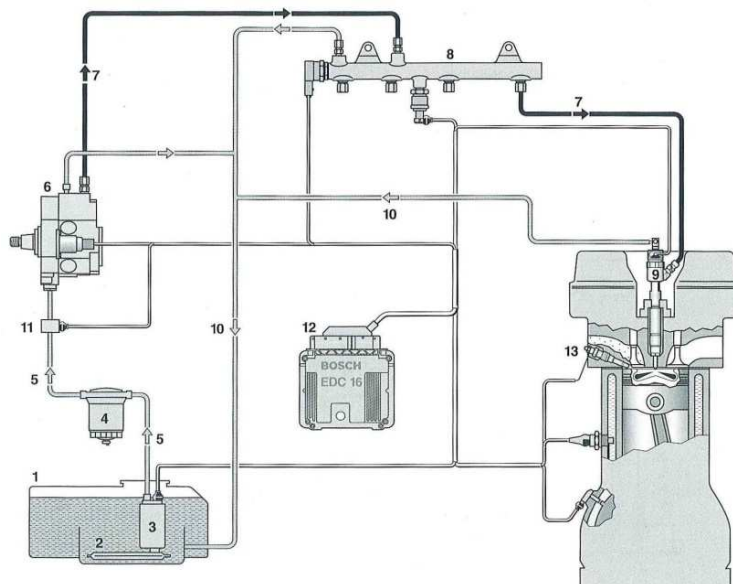
Rys. 17. Silnik Cummins 4BTAA 3.9 [11]



Rys. 18. Przykład aplikacji silnika Cummins 4BTAA 3.9 w konstrukcji lokomotywy typu Lds-100K-EM [11]

4.4 Układ zasilający typu *common rail*

W układzie zasilającym *common rail* (rys. 19) procesy wytwarzania ciśnienia i wtrysku są rozdzielone. Ciśnienie wtrysku, wytwarzane niezależnie od prędkości obrotowej silnika i dawki paliwa, jest utrzymywane w zasobniku paliwa. Chwilę wtrysku i dawkę oblicza sterownik elektroniczny, który przekazuje impulsy sterujące do zaworu elektromagnetycznego wtryskiwacza każdego cylindra silnika. Układ *common rail*, przeznaczony do silników o wtrysku bezpośrednim, umożliwia znacznie większą elastyczność dostosowania układu wtryskowego do silnika w porównaniu z konwencjonalnymi układami o napędzie krzywkowym [6].



Rys. 19. Układ zasilania paliwem układu *common rail* [3]

1 – zbiornik paliwa, 2 – filtr wstępnego oczyszczania paliwa, 3 – pompa zasilająca, 4 – filtr dokładnego oczyszczania paliwa, 5 – przewody paliwa niskiego ciśnienia, 6 – pompa wysokiego ciśnienia, 7 – przewody paliwa wysokiego ciśnienia, 8 – zasobnik paliwa wysokiego ciśnienia, 9 – wtryskiwacz, 10 – przewód przelewowy paliwa, 11 – czujnik temperatury paliwa, 12 – sterownik elektroniczny, 13 – świeca żarowa

Podstawowe zalety układu common rail to [6]:

- szerszy zakres stosowania,
- wysokie ciśnienie wtrysku (od około 140 MPa),
- zmienny początek wtrysku,
- możliwość wtrysku wstępnego, zasadniczego i dotrysku,
- ciśnienie wtrysku dostosowane do warunków pracy silnika.

Rozwój układów zasilania common rail związany jest w głównej mierze z wysokimi wymaganiami związanymi z jakością spalin, co jednak nie wyklucza konieczności stosowania elementów pozasilnikowej obróbki spalin.

Przykładem jednostki z układem common rail, wykorzystywanej w górniczej maszynie roboczej jest silnik 4045HF285 (rys. 20). Jest to konstrukcja czterocylindrowa, produkowana przez firmę John Deere i wykorzystywana do napędu lokomotywy typu WLP-50EM/H (rys. 21).



Rys. 20. Silnik John Deere 4045HF285 [11]



Rys. 21. Lokomotywa Wlp-50EM/H podczas eksploatacji na placu drzewnym kopalni [11]

5. Podsumowanie

W artykule przedstawiono silniki wysokoprężne z uwagi na zastosowane w nich układy zasilające. Dokonano przeglądu powszechnie stosowanych układów zasilających i przedstawiono silniki, wykorzystywane w układach napędowych maszyn transportowych opracowanych w ITG KOMAG. Zmiany w zakresie stosowanych układów zasilających powodowane są w głównej mierze rozwojem technologicznym samych silników. Najnowsze konstrukcje wykorzystują układy common rail, zarówno z uwagi na zalety tego systemu, jak i konieczność spełnienia norm emisji spalin. Ewolucja układów zasilających silnika wysokoprężnego spowodowała znaczne polepszenie warunków spalania mieszanki paliwowo-powietrznej, co wpłynęło pozytywnie na parametry użytkowe silnika, w tym ograniczenie emisji substancji szkodliwych w spalinach oraz wzrost mocy. W odniesieniu do jakości spalin oprócz układu zasilającego bardzo istotną rolę pełni układ oczyszczania spalin, pozwalający spełnić najbardziej rygorystyczne wymagania norm.

Literatura

- [1] Informator Techniczny Bosch, Promieniowe rozdzielaczowe pompy wtryskowe VR, Wydanie 2000/2001
- [2] Informator Techniczny Bosch, Układy wtryskowe Unit Injector System i Unit Pump System, Sterowanie Silników ZS, Wydanie 2011
- [3] Informator Techniczny Bosch, Zasobnikowe układy wtryskowe Common Rail, Sterowanie Silników ZS, Wydanie 2009
- [4] Klich A., Prugar E. i inni: Badania trakcyjne i wdrażanie osprzętu przeciwybuchowego i zabezpieczającego lokomotyw dołowych oraz badania związane z eksploatacją spalinowych zespołów napędowych w podziemnych wyrobiskach korytarzowych. Kompleksowe badania małotoksycznego spalinowego zespołu napędowego z osprzętem przeciwybuchowym i zabezpieczającym, Instytut Techniki Ciepłej. Zakład Silników Spalinowych. Politechnika Śląska, Gliwice 1986 (materiały niepublikowane)
- [5] Nasięk M. i inni: Zagadnienie oczyszczania spalin i zabezpieczeń przeciwybuchowych silników spalinowych dla górnictwa węglowego. Badanie i opracowanie wyników, KOMAG Gliwice 1973 (materiały niepublikowane)
- [6] Rychter T., Teodorczyk A.: Teoria silników tłokowych, WKŁ Warszawa 2006
- [7] Siurek J. i inni: Małotoksyczny napęd spalinowy dla górnictwa węglowego (na bazie krajowego silnika seryjnego). Badania wstępne, opracowanie programu i metodyki badań, KOMAG Gliwice 1978 (materiały niepublikowane)
- [8] Siurek J. i inni: Zagadnienie oczyszczania spalin i zabezpieczeń przeciwybuchowych silników spalinowych dla górnictwa węglowego. Sprawozdanie z badań – cz. II, KOMAG Gliwice 1975
- [9] Szlązak N., Borowski M.: Wentylacyjne aspekty stosowania maszyn z silnikami spalinowymi w kopalniach podziemnych. Biblioteka Szkoły Eksploatacji Podziemnej, Seria z lampką górniczą nr 13, Kraków 2002
- [10] Wajand J.A.: Trakcyjne silniki z zapłonem samoczynnym (silniki Diesla), WNT Warszawa 1973

- [11] Archiwum fotograficzne ITG KOMAG
- [12] Materiały informacyjne Deutz MWM
- [13] https://pl.wikipedia.org/wiki/Rudolf_Diesel
- [14] https://pl.wikipedia.org/wiki/Pompa_sekcyjna
- [15] https://pl.wikipedia.org/wiki/Pompa_rozdzielaczowa
- [16] <https://de.wikipedia.org/wiki/Common-Rail-Einspritzung>
- [17] https://en.wikipedia.org/wiki/Unit_injector
- [18] https://en.wikipedia.org/wiki/Injection_pump
- [19] <https://de.wikipedia.org/wiki/Einspritzpumpe>

Czy wiesz, że

...wychodząc naprzeciw rosnącym wymaganiom stawianym przekładniom zębatym dużych mocy, przedsiębiorstwo Transtecno® wprowadziło do produkcji przekładnie serii IRON. Linia IRON została zaprojektowana z myślą o ofercie produktów odpowiednich dla napędów pracujących w cyklu ciągłym, z zapewnieniem prawidłowego ich działania w każdych warunkach. Na serię IRON składają się zasadniczo trzy rodzaje przekładni: przekładnie walcowe ITH, przekładnie walcowo-stożkowe ITB i przekładnie walcowe płaskie ITS. Korpus przekładni IRON wykonany jest z żeliwa szarego typu EN-GJL-200, zapewniającego dużą sztywność. Geometrię korpusu zweryfikowano za pomocą oprogramowania MES. Przeprowadzono również badania niszczące na gotowych korpusach w celu sprawdzenia rzeczywistych ograniczeń strukturalnych. W górnej części żeliwnego korpusu umieszczono pokrywę inspekcyjną, która ułatwia pracę służbom utrzymania ruchu.

Napędy i Sterowanie 2017 nr 3 s.50-52