

Tomasz KAŁACZYŃSKI, Marcin ŁUKASIEWICZ, Damian IWANOWICZ

e-mail: kalaczynskit@utp.edu.pl

Zakład Pojazdów i Diagnostyki, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Bydgoszcz

Badania nierównomierności układu hydrauliki siłowej

Wstęp

Prawidłowa praca elementów wykonawczych układów hydraulicznych ma istotny wpływ na właściwą realizację procesów roboczych przez maszynę, urządzenie czy zespół pojazdu lub statku powietrznego. Zapewnienie stanu zdatności elementów wykonawczych, takich jak siłowniki hydrauliczne, umożliwi uniknięcie niespodziewanych, kosztownych przestojów maszyn, spowodowanych przez ich uszkodzenia oraz wpływa na poprawę jakości i bezpieczeństwa ich pracy [Żółtowski, 1996].

Z powyższych względów uzasadnione są działania mające na celu udoskonalanie istniejących oraz poszukiwanie nowych, bardziej dokładnych lub przyjaznych operatorowi, metod oceny stanu technicznego siłowników hydraulicznych.

Napędy hydrauliczne są tak skonstruowane, by przekazywały energię mechaniczną z miejsca jej wytwarzania do miejsca użytkowania za pośrednictwem cieczy roboczej. Ze względu na sposób przekazywania energii rozróżnia się dwa rodzaje napędów hydraulicznych:

- napędy hydrokinetyczne, wykorzystujące głównie energię kinetyczną cieczy roboczej,
- napędy hydrostatyczne, wykorzystujące głównie energię ciśnienia cieczy roboczej.

Napędy hydrokinetyczne stosowane są na ogół rzadko, w specjalnych wykonaniach, głównie jako sprzęgła i przekładnie hydrokinetyczne.

Napędy hydrostatyczne znalazły szerokie zastosowanie niemal we wszystkich typach współczesnych maszyn i mechanizmów. Przykładowym zastosowaniem tego typu napędu są układy hydrostatyczne w wózkach widłowych, w maszynach do robót ziemnych, w maszynach przeładunkowych, w urządzeniach walcowni, w urządzeniach dźwigowych, czy w maszynach rolniczych [Jędrzykiewicz i in., 2004].

Celem pracy było opracowanie metody badania nierównomierności ruchu posuwisto-zwrotnego tłoka siłownika hydraulicznego w aspekcie oceny jego stanu technicznego.

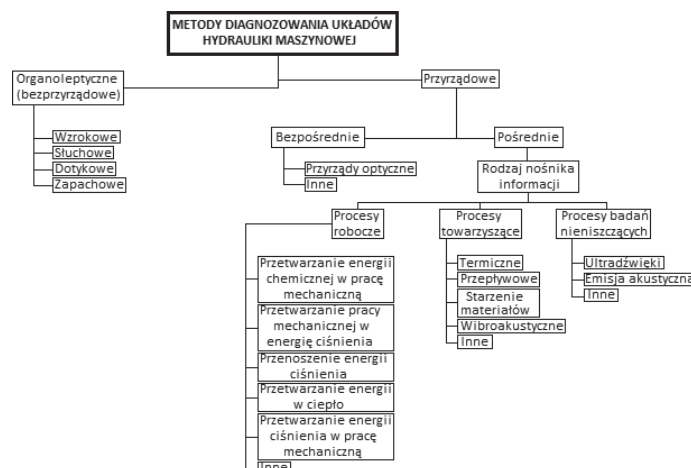
Aby to osiągnąć konieczne było:

- rozpoznanie możliwości zastosowania metod diagnostyki technicznej do oceny stanu technicznego siłowników hydraulicznych,
- analiza funkcjonowania siłownika hydraulicznego – modelowanie ruchu tłoka siłownika, identyfikacja występujących uszkodzeń,
- określenie czynników wpływających na nierównomierność ruchu tłoka,
- opracowanie metodyki badania nierównomierności ruchu tłoka siłownika,
- budowa stanowiska pomiarowego,
- badania eksperymentalne wpływu wyznaczonych czynników na przebieg ruchu tłoka siłownika na stanowisku laboratoryjnym,
- opracowanie metodyki oceny stanu technicznego siłownika hydraulicznego na podstawie nierównomierności ruchu tłoka.

Metody oceny stanu technicznego elementów siłownika hydraulicznego

Metody oceny stanu technicznego elementów układów hydraulicznych ze względu na środki techniczne zastosowane podczas procesu diagnozowania można najogólniej podzielić na bezprzyrządowe i przyrządowe. Szczegółowy podział przedstawiony został na rys 1.

W przypadku siłowników hydraulicznych podstawowym procesem roboczym jest zamiana energii ciśnienia zakumulowanej w cieczy roboczej na energię mechaniczną ruchu tłoka. Biorąc pod uwagę ten proces można oceniać stan techniczny siłownika na podstawie wartości przemieszczeń, prędkości, przyspieszenia oraz siły na tłoczysku

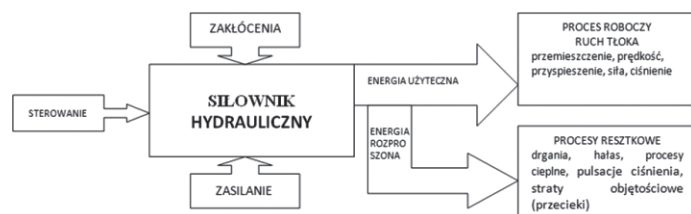


Rys. 1. Podział metod diagnozowania elementów hydrauliki maszynowej [Chalamoński, 2000]

porównując je z wartościami nominalnymi podanymi przez producenta lub obliczonymi teoretycznie.

Do procesów towarzyszących (reszkowych) podczas pracy siłownika hydraulicznego należą procesy wibroakustyczne (drżania, emisja akustyczna), zaburzenia przepływu (wywołane stratami ciśnienia i stratami objętościowymi – przecieki wewnętrzne i zewnętrzne) oraz procesy termiczne (zmiany temperatury elementów siłownika) [Garbacik, 1997].

Procesy zachodzące w czasie pracy siłownika oraz ich podstawowe parametry, które mogą być wykorzystane do oceny jego stanu technicznego, przedstawiono schematycznie na rys. 2.



Rys. 2. Procesy zachodzące w siłowniku hydraulicznym

Metodyka badań stanowiskowych

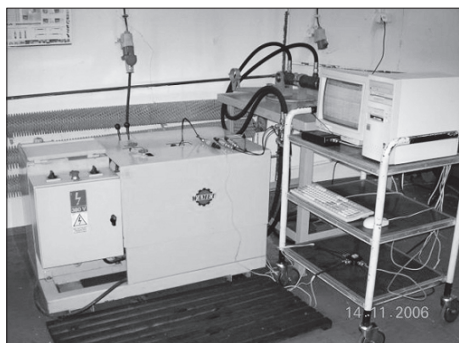
Celem prowadzonych badań stanowiskowych było wyznaczenie wpływu poszczególnych, omówionych wcześniej, czynników na nierównomierność ruchu tłoka siłownika oraz zbadanie ich wzajemnych zależności. Kolejnym zadaniem było określenie przydatności analizy zmian prędkości ruchu tłoka przy wykrywaniu uszkodzeń wewnętrznych elementów siłownika.

Dla realizacji postawionych celów badania przeprowadzone zostały według następującego harmonogramu:

- pomiary prędkości ruchu tłoka siłownika w stanie zdatności dla różnych wartości parametrów cieczy zasilającej:
 - ciśnienia,
 - natężenia przepływu,
 - temperatury,
 - różnych wartości obciążenia tłoka,
- modelowanie uszkodzeń elementów siłownika,

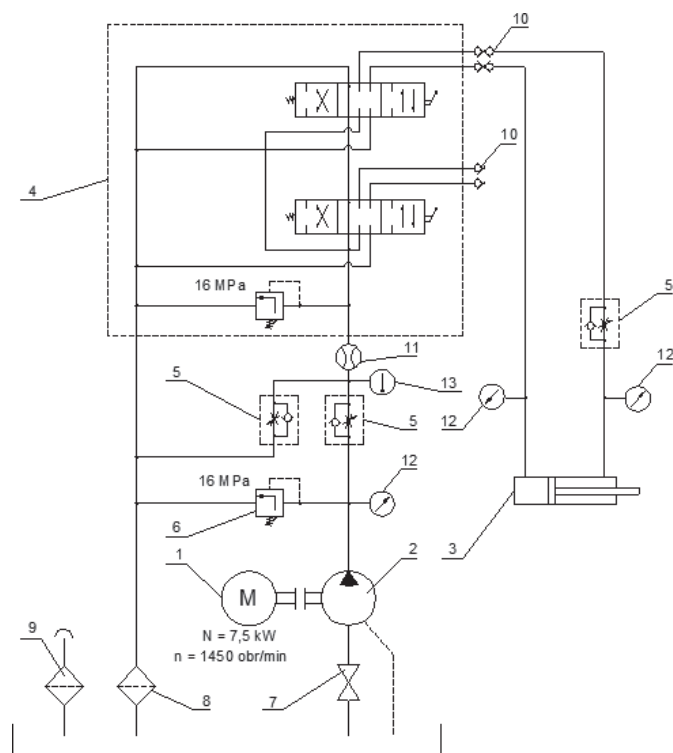
- pomiary prędkości ruchu tłoka siłownika w stanie niezdatności dla zmiennych warunków zasilania i obciążenia,
- analiza otrzymanych wyników pod kątem oceny wrażliwości zmian prędkości ruchu tłoka na zmiany stanu elementów siłownika [Mench, 2004].

W celu przeprowadzenia zamierzonych badań zbudowano laboratoryjne stanowisko pomiarowe (Rys. 3). Można je podzielić na następujące bloki funkcjonalne: blok zasilania, blok sterowania, blok obciążenia, blok pomiarowy, badany siłownik.



Rys. 3. Widok stanowiska do badań nierównomierności ruchu tłoka siłowników hydraulicznych

Schemat hydrauliczny omawianego stanowiska przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Schemat hydrauliczny stanowiska pomiarowego 1 – silnik elektryczny, 2 – pompa hydrauliczna wielotłoczkowa, 3 – siłownik, 4 – rozdzielacz, 5 – zawór zwrotno-dławiaczy, 6 – zawór przelewowy, 7 – zawór odcinający, 8 – filtr, 9 – filtr wlewowy, 10 – szybkozłącze, 11 – przepływomierz, 12 – przetwornik ciśnienia, 13 – przetwornik temperatury

Weryfikację wpływu czynników na pracę tłoka siłownika przeprowadzono dla dwóch kierunków pracy tłoka, a mianowicie podczas wysunięcia oraz w kierunku przeciwnym, z uwagi na różne wartości powierzchni tłoka. Ponadto badania obejmowały symulację parametrów pracy dotyczących trzech położen zaworów bezpieczeństwa i upustowego: dla całkowicie otwartego, w połowie otwartego i zamkniętego, wykonane w trzech seriach pomiarowych.

Stanowisko badawcze umożliwiło przeprowadzenie badań równomierności ruchu tłoka siłownika hydraulicznego. Badanie następowało po uruchomieniu jednego z dwóch *Auto*-programów. Po uruchomieniu stanowiska należało dokonać bazowania układu. Bazowanie układu

przebiegało w trybie ręcznym przez wciskanie i przytrzymanie odpowiednich przycisków. Do badań równomierności ruchu tłoka służył program *Auto 2*.

W celu dokonania pomiarów należało ustalić odpowiednie warunki pracy siłownika. Badania przeprowadzono dla czterech różnych prędkości ruchu tłoka siłownika wynoszących: $V1 = 0,167$ m/s, $V2 = 0,05$ m/s, $V3 = 0,033$ m/s, $V4 = 0,025$ m/s.

Różne prędkości osiągnano przez odpowiednie nastawy zaworu dławiącego – 1.

Pomiary przeprowadzono dla czterech wartości obciążeń. Wielkości obciążeń podczas wysuwu tłoczyska badanego siłownika, określone przez nastawy zaworu przelewowego wynosiły:

$$N1 = 30 \text{ kN}, N2 = 40 \text{ kN}, N3 = 50 \text{ kN}, N4 = 60 \text{ kN}.$$

Wielkości obciążeń podczas wsuwu tłoczyska badanego siłownika określone przez nastawy zaworu przelewowego wynosiły:

$$N1 = 15 \text{ kN}, N2 = 20 \text{ kN}, N3 = 25 \text{ kN}, N4 = 29 \text{ kN}.$$

Zmianę ciśnienia w układzie osiągnano dzięki zastosowaniu zaworu przelewowego.

Badania podczas wysuwu tłoczyska siłownika hydraulicznego przeprowadzono dla trzech wielkości niewspółosiowości obciążenia. Niewspółosiowe obciążenie osiągnięto przez ustalenie rolki w odległościach 10 mm i 20 mm od położenia w osi siłowników, w którym również dokonano pomiarów.

Podczas badania tłok siłownika pokonał odległość równą maksymalnemu skokowi – 500 mm w wybranym kierunku. Po zakończeniu prób wyniki zebrane zostały w sterowniku znajdującym się w skrzynce elektrycznej. Po zakończeniu badania wyniki przekazane zostały do komputera za pomocą złącza RS 232.

Wszystkie pomiary przeprowadzono dla trzech tłoczysk o wymiarach: $\phi 36h9$, $\phi 36c9$, $\phi 36b9$. Tłoczyska o różnych pasowaniach zastosowano w celu symulacji zużycia (pasowanie $\phi 36b9$ – największe zużycie, pasowanie $\phi 36h9$ – najmniejsze zużycie).

W stanowisku zastosowano olej hydrauliczny HD 46 VECO. Badania przeprowadzono w zakresie roboczej temperatury oleju hydraulicznego nie przekraczającej 65°C .

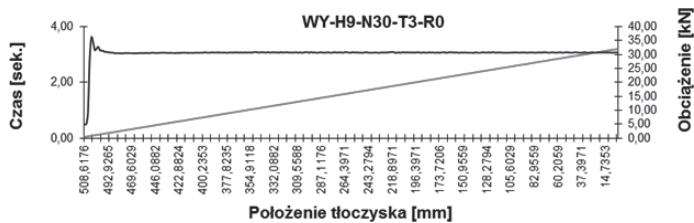
Program wyposażony jest także w tryb *Auto 1* służący do badania wielkości przecieków wewnętrznych i zewnętrznych. Podczas działania programu *Auto 1* tłok siłownika przesuwany jest od położenia maksymalnego wysuwu do maksymalnego wsuwu oraz z położenia maksymalnego wsuwu do położenia początkowego. Podczas pełnego cyklu tłok zatrzymuje się w sześciu położeniach, w których dokonywane są pomiary ciśnień po stronie zasilającej i po stronie biernej, oraz pomiar przesunięcia. Przed rozpoczęciem badania należy podać odpowiednie parametry. Położenie punktów pomiarowych jest ustalane przez wpisanie wartości za pośrednictwem panelu sterowania umieszczonego w skrzynce elektrycznej. Wartości z czujników przekazywane są do sterownika w dziesięciosekundowych odstępach czasu. Czas pomiaru w każdym punkcie określany jest przez wpisanie odpowiedniej wartości w zakresie od 10 do 300 s za pośrednictwem panelu sterowania.

Podczas badań siłownik badany był unieruchomiony dzięki zastosowaniu zamka typu Z2561-6X firmy REXROTH, natomiast siłownik bierny unieruchomiony był przez zamknięcie jednego z zaworów przelewowych (w zależności od kierunku ruchu) typu DB10-1-5x/50 również firmy REXROTH.

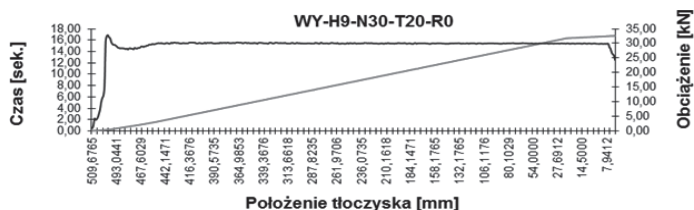
Omówienie wyników

Wyniki badań oceny stanu technicznego siłownika hydraulicznego na podstawie nierównomierności ruchu tłoka przedstawiono na rys. 5–8. Na osi X podano położenie [mm] tłoczyska siłownika badanego (pozycja: 0 mm – oznacza maksymalne wysunięcie, pozycja: 500 mm – oznacza maksymalne wsunięcie). Na osiach Y podano wielkość obciążenia [kN] działającego na badany siłownik oraz czas [s].

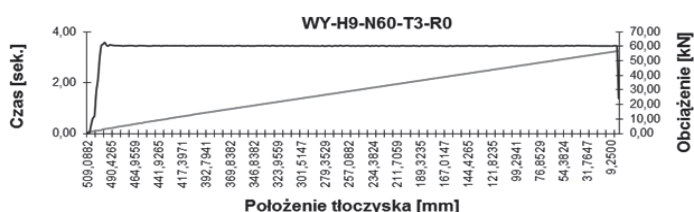
Na podstawie wyników pomiarów można stwierdzić, że równomierność ruchu tłoka siłownika hydraulicznego podczas wysuwu jest znacznie większa przy wyższych średnich prędkościach tłoka. (Rys. 5–8). W badaniach zastosowano obciążenie wynoszące 30 kN przyłożone współosiowo.



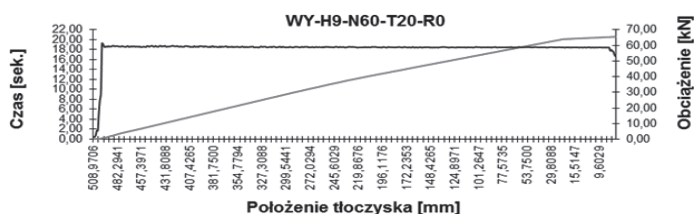
Rys. 5. Wysuw tłoczyska, tłoczysko o pasowaniu h9, obciążenie 30 kN, czas wysuwu 3 s (średnia prędkość ruchu tłoka $V_1 = 0,167$ m/s), obciążenie współosiowe (rolka w położeniu 0)



Rys. 6. Wysuw tłoczyska, tłoczysko o pasowaniu h9, obciążenie 30 kN, czas wysuwu 20 s (średnia prędkość tłoka ruchu $V_4 = 0,025$ m/s), obciążenie współosiowe (rolka w położeniu 0)



Rys. 7. Wysuw tłoczyska, tłoczysko o pasowaniu h9, obciążenie 60 kN, czas wysuwu 3 s (średnia prędkość ruchu tłoka $V_1 = 0,167$ m/s), obciążenie współosiowe (rolka w położeniu 0)



Rys. 8. Wysuw tłoczyska, tłoczysko o pasowaniu h9, obciążenie 60 kN, czas wysuwu 20 s (średnia prędkość ruchu tłoka $V_4 = 0,025$ m/s), obciążenie współosiowe (rolka w położeniu 0)

Na rys. 5–8 można także zaobserwować zmianę obciążenia siłownika w zależności od położenia tłoczyska. W okresie początkowym następuje nagły przyrost obciążenia, aż do ustabilizowania jego poziomu. Podczas początkowego etapu ruchu tłoka siłownika wzrost obciążenia ponad wartość średnią spowodowany jest zwiększonymi oporami ruchu. W końcowym etapie ruchu wielkość obciążenia spada.

Wnioski

Analiza pracy siłownika hydraulicznego wskazuje, że obok strat objętościowych spowodowanych zużyciem elementów, wpływ na pracę tłoka mają takie czynniki, jak: lepkość, ściśliwość, ciśnienie, natężenie przepływu cieczy roboczej oraz temperatura pracy.

W pierwszym etapie badań dotyczących wpływu wybranych czynników na pracę siłownika hydraulicznego nie zmieniano lepkości czy ściśliwości cieczy roboczej, ponieważ obiektem badań był siłownik. Służyły one regulacji natężenia przepływu przez zawory bezpieczeństwa i upustowy przy jednoczesnej weryfikacji wartości temperatury, ciśnienia pod i nad tłoczyskiem oraz czasu pracy tłoka.

Przedstawione wyniki badań jednoznacznie wskazują, że wymienione parametry pracy siłownika hydraulicznego wpływają w znacznym stopniu na charakter wykonywanych procesów roboczych.

Symulowane parametry pracy siłownika wraz z uzyskanymi wynikami badań wskazują na większą wrażliwość układu na zmianę położeń

zaworu upustowego w stosunku do zaworu bezpieczeństwa. Wpływają one w znacznym stopniu na uzyskane wartości ciśnień w układzie, a szczególnie na przekroczenie ciśnień roboczych, co oddziałuje na funkcjonowanie całego układu i zabezpieczenie przed niewskazanymi przeciążeniami.

Analiza wyników pierwszego etapu badań ilustruje zmienność charakteru pracy w zależności od kierunku ruchu tłoka siłownika hydraulicznego.

Badania oceny stanu technicznego siłownika hydraulicznego na podstawie nierównomierności pracy tłoka wskazują, że podczas początkowego etapu ruchu tłoka siłownika wzrost obciążenia ponad wartość średnią spowodowany jest zwiększonymi oporami ruchu. Zależą one od czasu spoczynku tłoka przed jego uruchomieniem. Okres rozruchu siłownika nie trwa dłużej niż 0,1 s. Przebieg zmian obciążenia podczas rozruchu siłownika jest stabilniejszy dla pracy przy wyższych obciążeniach (wyższych ciśnieniach) i mniejszych prędkościach ruchu tłoka. Wraz ze wzrostem obciążenia spada długość okresu rozruchu siłownika.

Na podstawie wyników pomiarów można stwierdzić, że zużycie tłoczyska siłownika, symulowane w trakcie badań przez rodzaj pasowania, ma istotny wpływ na równomierność ruchu tłoka. Ruch tłoka charakteryzuje się większą nierównomiernością dla tłoczysk o większym zużyciu.

Wzrost obciążenia tłoka siłownika powoduje zwiększenie nierównomierności jego ruchu. Znaczny przyrost nierównomierności wraz z przyrostem obciążenia następuje powyżej średnich prędkości ruchu tłoka wynoszących ok. 0,05 m/s.

Istotny wpływ na równomierność ruchu tłoka siłownika hydraulicznego ma niewspółosiowość przyłożonego obciążenia poniżej średnich prędkości ruchu tłoka wynoszących 0,05 m/s. Może to być spowodowane znacznymi siłami, działającymi na węzły prowadzące tłoczysko oraz tłok, wywołanymi niewspółosiowością obciążenia.

Prędkość tłoka siłownika hydraulicznego ma decydujący wpływ na jego równomierność. Wraz ze wzrostem prędkości tłoka rośnie jego równomierność.

Dla średnich prędkości tłoka powyżej ok. 0,167 m/s przyrost obciążenia do wartości 60 kN podczas wysuwu nie powoduje znaczących zakłóceń równomierności ruchu. Również niewspółosiowe przyłożenie obciążenia nie wpływa w znaczącym stopniu na równomierność ruchu tłoka. Zależność ta wynika ze zmian rodzaju tarcia wraz ze zmianą prędkości.

Wielkość tarcia między elementami uszczelniającymi a ścianą cylindra lub tłoczyska wzrasta wraz ze spadkiem prędkości ruchu tłoka. Podczas badań stosowano prędkości ruchu tłoka, przy których występowało tarcie mieszane. W zakresie tym występowały drgania relaksacyjne wpływające na przebieg ruchu tłoka.

Wyniki badań siłownika hydraulicznego przeprowadzone w dwóch etapach dla wpływu wybranych czynników oraz ocena stanu technicznego poprzez badanie nierównomierności pracy tłoka wskazują na istotność i potrzebę prowadzenia dalszych badań w tym kierunku. Badania powinny być rozszerzone o inne czynniki, czy też innego rodzaju wymuszenia wpływające na wykonywane procesy robocze elementów wykonawczych układów hydraulicznych.

LITERATURA

Chalamoński M., 2000. *Diagnostowanie układów hydraulicznych maszyn roboczych*. Wyd. ATR, Bydgoszcz.
 Garbacik A., 1997. *Studium projektowania układów hydraulicznych*, Ossolineum, Kraków
 Jędrzykiewicz Z., Pluta J., Stojek J., 2004. *Napęd i sterowanie hydrauliczne*, Wyd. AGH, Kraków
 Menchen P., 2006. *Analiza zmian prędkości ruchu siłownika hydraulicznego w aspekcie oceny stanu technicznego jego elementów*, Materiały X Międzynarodowego Sympozjum im. prof. Cz. Kanafojskiego nt. „Problemy budowy oraz eksploatacji maszyn i urządzeń rolniczych”, Płock
 Żółtowski B., 1996. *Podstawy diagnostyki maszyn*, Wyd. ATR, Bydgoszcz

Pracę wykonano w ramach projektu WNP-POIG.01.03.01-00-212/09.