

## РЕГУЛАЦИЈА ХИДРОСТАТИЧКИХ ПОГОНА МОБИЛНИХ МАШИНА

*Проф. др Драгослав Јаношевић,  
Весна Николић, дип. маш. инж.  
Миљан Ђорђевић, студент  
Срђан Поткоњак, студент*

Универзитет у Нишу, Машински факултет

### Резиме

У раду су дати резултати анализе начина и критеријума регулације хидростатичких система мобилних машина. Посматрају се хидростатички системи које образују затворена хидрауличка кола: а) са хидропумпом променљивог и хидромотором константног специфичног протока, б) са хидропумпом и хидромотором променљивог специфичног протока. При упоредној анализи, за наведене варијантне хидростатичких система, посматра се однос улазних и излазних параметара и дефинишу могућности регулације система. Начини регулације хидростатичких система дати су кроз структурну анализу механичких система као носиоца сигнала регулације и анализу софтвера у којима су садржани критеријуми регулације система.

**Кључне речи:** хидростатички системи, регулација

### 1. УВОД

Хидростатички системи са хидропумпама и хидромоторима, за пренос енергије код мобилних машина, образују следећа могућа затворена хидрауличка кола: а) са хидропумпом и хидромотором константног специфичног протока, б) са хидропумпом променљивог и хидромотором константног специфичног протока (сл. 1а), в) са хидропумпом константног и хидромотором променљивог специфичног протока (сл. 1б), г) са хидропумпом и хидромотором променљивог специфичног протока (сл. 1в).

Наведене могуће варијанте хидростатичких система имају различите катактеристике и могућности регулације али у основи имају исту конфигурацију коју чине: дизел мотор 1 (сл.1), еластична спојница 2, главна хидропумпа 3, помоћна хидропумпа за прехранивање система 3.1, систем управљања 4, хидромотор

5, вентил сигурности потисних водава главне хидропумпе 6.1 и вентил сигурности помоћне пумпе 6.2.

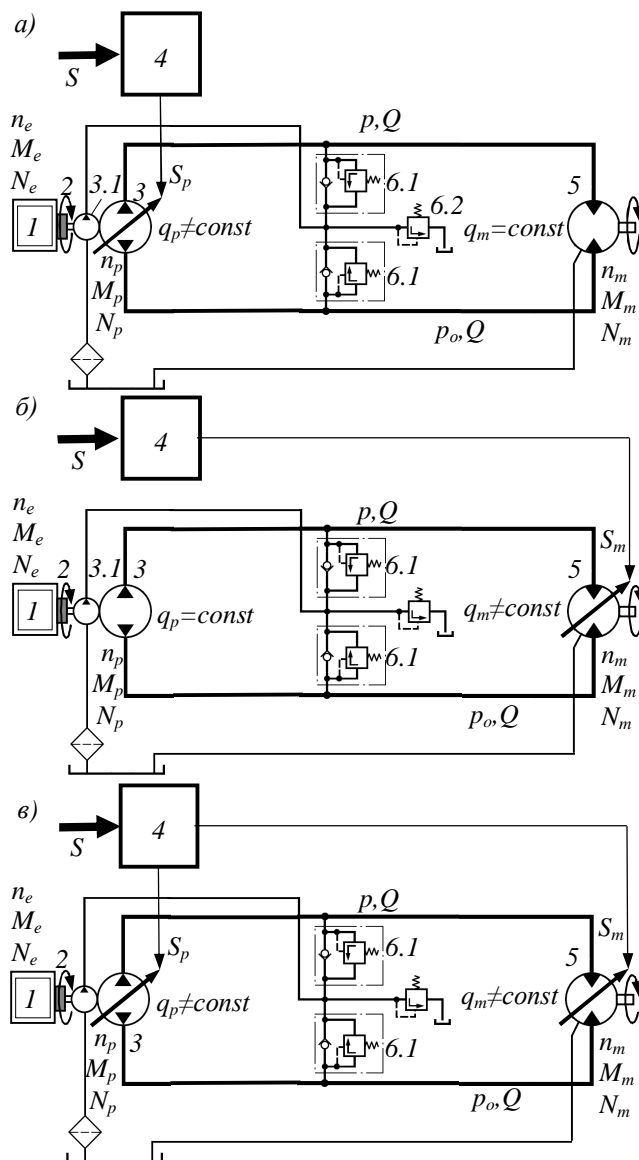
У овом раду, при упоредној анализи, посматра се однос улазних и излазних параметара система.

Улазни параметри система су број обртаја  $n_p$  (сл.1) и момент  $M_p$ , односно снага  $N_p$  на вртилу хидропумпе 3. Параметри механичке снаге на вратилу хидропумпе одговарају броју обртаја  $n_e$  и моменту  $M_e$ , односно снази  $N_e$  погонског мотора 1.

Хидропумпа механичке параметре снаге претвара у параметре хидрауличке снаге  $N_h$  у облику притисака  $p$  и протока  $Q$  система, које хидромотор 5 трансформише поново у параметре механичке снаге  $N_m$ , у облику броја обртаја  $n_m$  и момента  $M_m$  на излазном вратилу хидромотора, односно на излазу система.

При упоредној анализи посматрају се идеални хидростатички системи, без механичких, хидрауличких и других губитака, са укупним степеном искорисности  $\eta_u=1$ . Осим тога, узима се да погонски дизел мотор ради константним бројем обртаја  $n_{en}=const=n_p$  при максималној снази  $N_{en}=N_p$ .

Наведене претпоставке немају утицаја на принципијелне анализе функција система [1].



Сл.1 Хидростатички системи са хидропумпама и хидромоторима у затвореним хидрауличким колама који се користе за пренос енергије код мобилних машина

На основу уведених претпоставки, према једначини континуитета, проток  $Q_p$  хидропумпе једнак је протoku  $Q_m$  хидромотора, односно протoku система  $Q$ :

$$Q_p = Q_m = Q \quad (1)$$

Према изразима за проток хидропумпе и хидромотора

$$Q_p = \frac{q_p \cdot n_p}{1000} = k_p \cdot q_p \cdot n_p \quad (2)$$

$$Q_m = \frac{q_m \cdot n_m}{1000} = k_p \cdot q_m \cdot n_m \quad (3)$$

на основу једначине 1 добија се преносни однос  $i_n$  система:

$$i_n = \frac{n_m}{n_p} = \frac{q_p}{q_m} \quad (4)$$

који показује да се излазни број обртаја  $n_m$  хидромотора може мењати, за константни улазни број обртаја хидропумпе,  $n_p = n_{en} = const$ , променом специфичног протoka хидропумпе  $q_p$  и хидромотора  $q_m$ .

За идеални систем, снага  $N_p$  хидропумпе једнака је снази  $N_m$  хидромотора, односно снази система  $N_h$ :

$$N_p = N_m = N_h \quad (5)$$

Према изразима за снагу хидропумпе и хидромотора:

$$N_p = k_n \cdot M_p \cdot n_p \quad (6)$$

$$N_m = k_n \cdot M_m \cdot n_m \quad (7)$$

на основу једначина 3 и 4 добија се коефицијент трансформације  $i_M$  система:

$$i_M = \frac{M_m}{M_p} = \frac{q_m}{q_p} = \frac{1}{i_n} \quad (8)$$

који показује да се излазни момент  $M_m$  хидромотора може мењати, за константни улазни момент погонског мотора,  $M_p = M_{en} = const$ , променом специфичног протoka хидропумпе  $q_p$  и променом специфичног протoka хидромотора  $q_m$ .

## 2. РЕГУЛАЦИЈА ПАРАМЕТАРА СИСТЕМА

У наставку рада дата је анализа параметара система са хидропумпом променљивог и хидромотором константног специфичног протoka и система са хидропумпом и хидромотором променљивог специфичног протoka који су највише заступљени као погонски системи мобилних машина.

### 2.1. Системи са хидропумпом променљивог и хидромотором константног специфичног протoka

Код ових система, на основу одређеног мануелног, хидрауличког, електричног или електронског улазног сигнала управљања  $S$  (сл.2а), који се у регулатору 4 трансформише у сигнал регулације  $S_p$  хидропумпе 3, врши се промена специфичног протoka хидропумпе у интервалу  $q_p = [0, q_{pmax}]$ .

Пошто је специфични проток хидромотора 5 константан,  $q_m = const$ , према једначини 4, променом специфичног протoka хидропумпе постиже се линеарна промена излазног броја обртаја хидромотора:

$$n_m = n_p \frac{q_p}{q_m} = n_{en} \frac{q_p}{q_m} = k \cdot q_p \quad \forall \quad q_p = 0 \Rightarrow n_m = 0 \quad (9)$$

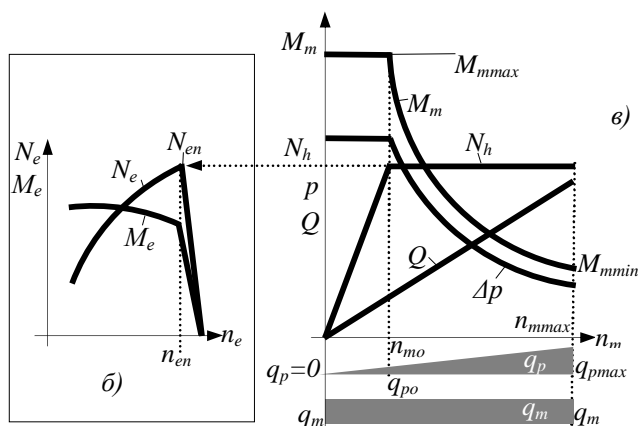
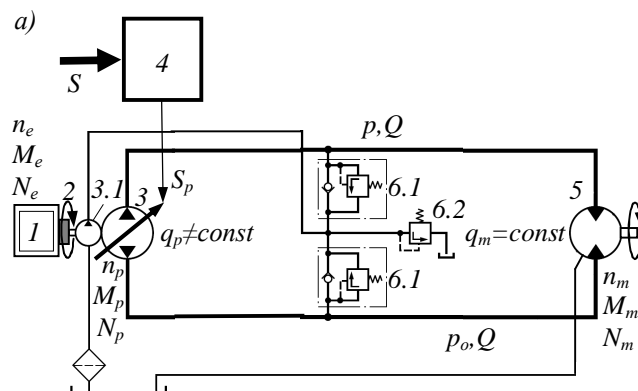
Када је хидропумпа у неутралном положају ( $q_p = 0$ ) нема преноса енергије кроз систем - вратило хидромотора се не окреће ( $n_m = 0$ ) (сл.2в).

Са порастом специфичног протoka хидропумпе расте проток  $Q$  и снага  $N_p$  хидропумпе, односно система, уз могућност постизања максимално могућег момента  $M_{mmax}$  на излазном вратилу хидромотора који има вредност:

$$M_{mmax} = \frac{q_m \cdot \Delta p_{max}}{2\pi} \quad (10)$$

где је:  $\Delta p_{max} = p_{max} - p_o$  - максимални пад притиска у хидромотору изражен као разлика максималног притиска  $p_{max}$  у потисном воду хидромотора (одговара притиску отварања вентила сигурности 6.1 система) и притиска  $p_o$  у повратном воду хидромотора.

Са порастом броја обртаја хидромотора максимални излазни момент је могуће одржати све до достизања максималне снаге  $N_h$  система, када специфични проток  $q_{po}$  хидропумпе, према једначинама 4 и 10, има вредност:



Сл.2 Систем са хидропумпом променљивог и хидромотором константног специфичног протoka: а) шема, б) карактеристике дилематора, в) излазне карактеристике хидромотора

$$q_{po} = \frac{M_p}{M_{mmax}} q_m = \frac{2\pi \cdot M_{en}}{\Delta p_{max}} \quad (11)$$

коме одговара број обртаја  $n_{mo}$  хидромотора:

$$n_{mo} = n_p \frac{q_{po}}{q_m} = n_p \frac{2\pi \cdot M_{en}}{q_m \cdot \Delta p_{max}} \quad (12)$$

Да би се, при даљем повећању броја обртаја хидромотора ( $n_m > n_{mo}$ ), одржала константна снага  $N_h = N_{en} = const$  потребно је да се специфични проток  $q_p$  хидропумпе мења према једначини:

$$q_p = \frac{M_{en}}{M_m} q_m = \frac{2\pi \cdot M_{en}}{\Delta p} = \frac{k_m}{\Delta p} \quad \forall n_m > n_{mo} \quad (13)$$

где је:  $\Delta p = p - p_o$  - пад притиса у хидромотору при притиску  $p < p_{max}$  у потисном воду хидромотора, односно хидропумпе,  $k_m$ - константа.

Последња једначина показује да се, при постављеном услову, специфични проток хидропумпе мења обрнуто пропорционално повећању притиска хидромотора, што одговара регулацији хидропумпе по критеријуму **константне снаге**.

На основу једначина 4 и 8 добија се хиперболична зависност момента  $M_m$  и броја обртаја  $n_m$  хидромотора (сл.2в):

$$M_m = M_p \frac{q_m}{q_p} = M_{en} \frac{n_{en}}{n_m} = \frac{k_e}{n_m} \quad \forall n_m > n_{mo} \quad (14)$$

односно, према претходној једначини, следи и хиперболична зависност пада притиска  $\Delta p$  и броја обртаја  $n_m$  хидромотора (сл.2в):

$$\Delta p = 2\pi \cdot M_{en} \frac{n_{en}}{q_m \cdot n_m} = \frac{k_p}{n_m} \quad \forall n_m > n_{mo} \quad (15)$$

где је:  $k_e, k_p$ - константе.

Према једначинама 1 и 3, пошто је специфични проток хидромотора константан, проток хидропумпе се линеарно мења са порастом броја обртаја хидромотора (сл.2в):

$$Q_m = Q = \frac{q_m \cdot n_m}{1000} = k_Q \cdot n_m \quad (16)$$

Максимални број обртаја  $n_{mmax}$  хидромотора се постиже при максималном специфичном протоку  $q_{pmax}$  хидропумпе:

$$n_{mmax} = n_{en} \frac{q_{pmax}}{q_m} \quad (17)$$

при чему је могуће остварити минимални момент хидромотора:

$$M_{mmin} = M_{en} \frac{q_m}{q_{pmax}} \quad (18)$$

Максимални преносни однос система износи:

$$i_{nmax} = \frac{q_{pmax}}{q_m} \quad (19)$$

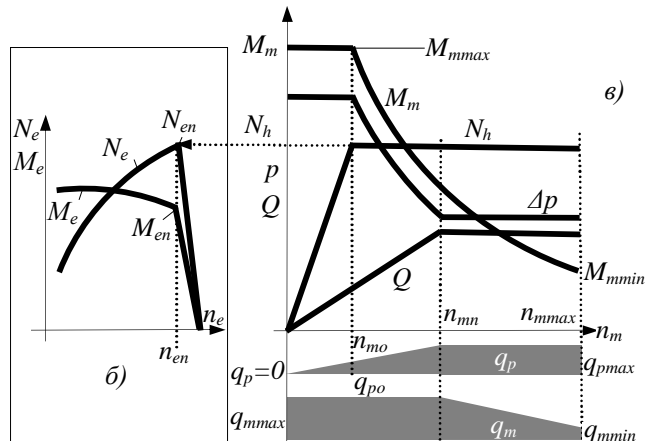
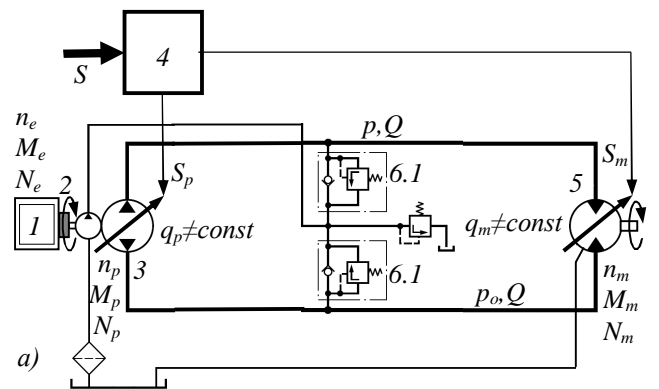
Хидростатички системи са хидропумпом променљивог и хидромотором константног специфичног протока се често примењују. Омогућују континуалну промену броја обртаја хидромотора променом специфичног протока хидропумпе. Осим тога могуће је остварити регулацију хидропумпе тако да се при различитим оптерећењима хидромотора користи максимална расположива снага дизел мотора.

### 2.3. Системи са хидропумпом и хидромотором променљивог специфичног протока

Код ових система, на основу одређеног мануелног, хидрауличког, електричног или електронског улазног сигнала управљања  $S$  (сл.3а), који се у регулатору 4 трансформише у сигнал регулације  $S_p$  хидропумпе 3 и сигнал  $S_m$  регулације хидромотора 5, врши се, наизменично или симултано, промена специфичног протока хидропумпе у интервалу  $q_p = [0, q_{pmax}]$  и специфичног протока хидромотора у интервалу  $q_m = [q_{mmin}, q_{mmax}]$ . Промена броја обртаја  $n_m$  хидромотора, према једначини 4, зависи од промене специфичног протока  $q_p$  хидропумпе и специфичног протока  $q_m$  хидромотора:

$$n_m = n_p \frac{q_p}{q_m} = n_{en} \frac{q_p}{q_m} \quad (20)$$

тако да се минимални број обртаја  $n_{mmin}$  хидромотора постиже при минималном специфичном протоку  $q_{pmin}$  хидропумпе и максималном специфичном протоку  $q_{mmax}$  хидромотора:



Сл.3 Систем са хидропумпом и хидромотором променљивог специфичног протока: а) шема, б) карактеристике дизел мотора, в) излазне карактеристике хидромотора

$$n_{mmin} = n_p \frac{q_{pmin}}{q_{mmax}} = n_{en} \frac{q_{pmin}}{q_{mmax}} \quad \forall q_{pmin} = 0 \Rightarrow n_{mmin} = 0 \quad (21)$$

а максимални број обртаја  $n_{mmax}$  хидромотора при максималном специфичном протоку  $q_{pmax}$  хидропумпе и минималном специфичном протоку  $q_{mmin}$  хидромотора:

$$n_{mmax} = n_p \frac{q_{pmax}}{q_{mmin}} = n_{en} \frac{q_{pmax}}{q_{mmin}} \quad (22)$$

Први део регулације система је са константним специфичним протоком хидромотора,  $q_m = const$ , (сл.3в) и променљивим специфичним протоком хидропумпе,  $q_p \neq const$ , и одвија се до броја обртаја  $n_{mn}$  хидромотора чија је вредност:

$$n_{mn} = n_p \frac{q_{pmax}}{q_{mmax}} = n_{en} \frac{q_{pmax}}{q_{mmax}} \quad (23)$$

У овом делу регулације система максимално могући момента  $M_{mmax}$  на излазном вратилу хидромотора износи:

$$M_{mmax} = \frac{q_{mmax} \cdot \Delta p_{max}}{2\pi} \quad (24)$$

Други део регулације система је са константним специфичним протоком хидропумпе,  $q_p = const$ , (сл.3в) и променљивим специфичним протоком хидромотора,  $q_m \neq const$  при чему је могући минимални момент хидромотора:

$$M_{mmin} = M_p \frac{q_{mmin}}{q_{pmax}} = M_{en} \frac{q_{mmin}}{q_{pmax}} \quad (25)$$

Максимални преносни однос система износи:

$$i_{nmax} = \frac{q_{pmax}}{q_{mmin}} \quad (26)$$

Хидростатички системи са хидропумпом и хидромотором променљивог специфичног протока су нашли широку примену јер омогућују, у односу на остале системе, знато већи преносни однос  $i_n$  система, поред континуалне промене броја обртаја хидромотора уз коришћење максималне расположиве снаге погонског мотора.

### 3. ПРИМЕРИ РЕГУЛАЦИЈЕ СИСТЕМА

Системи управљања савремених мобилних машина се остварује мекатроничким системима које у основи граде (сл. 4а): а) електронске компоненте са: сензорима, потенциометрима и микроконтролерима и б) хидростатичке компоненте са: регулаторима дизел мотора, хидропумпи, хидромотора и актуатора погонског система машине.

Уопштено, мекатронички систем управљања функционише тако што **сигнали стања** кинематичког ланаца и погонског система машине, прикупљени сензорима 1 (сл.4б), и **командни сигнали** руковаоца, пренети преко потенциометара 2, чине улазне (најчешће аналогне) сигнале микроконтролера 3. Помоћу микро-

контролера улазни аналогни сигнали се прво петварају у дигиталне а затим се обрађују одговарајућим софтвером. Обрађени дигитални сигнали се поново претварају у излазне аналогне сигнале помоћу којих се преко регулатора одговарајућих карактеристика врши управљање и регулација компонената погонског система машине: дизел мотора 4, хидропумпи 5 и актуатора (хидромотора и хидроцилиндара) 6.

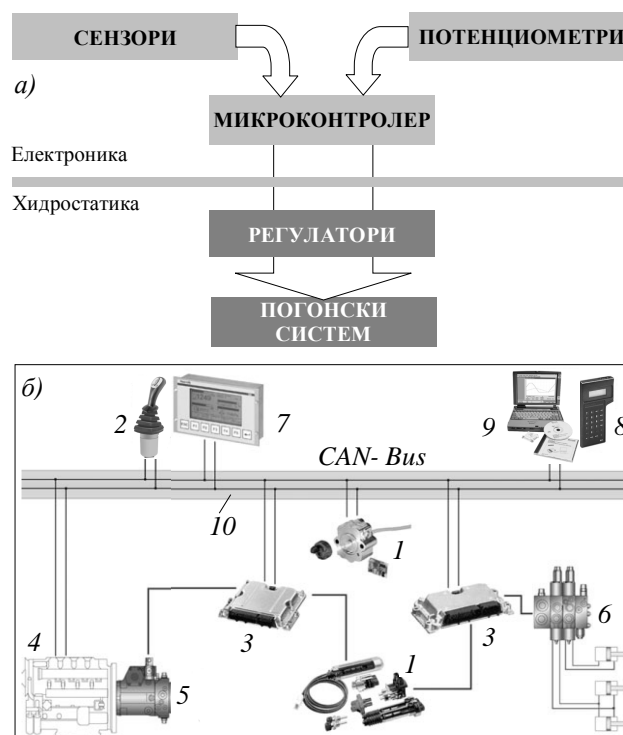
Микроконтролер је, осим са сензорима и потенциометрима, повезан са мониторинг системом (дисплејом) 7 за праћење параметара сатања система и са спољним уређајима: командним пултом 8 или рачунаром 9 са софтвером за дијагностику и параметарско подешавање система. Комуникација сигнала мекатроничког система остварује се CAN Bus (*Controller Area Network*) магистралама 10.

Мекатроничким системима управљања код мобилних машина, поред осталог, постигнута је: а) аутоматска регулација трансмисија кретања према програмираним критеријумима функција уз ограничења везана за стабилност кретања при проклизавањању, преоптерећење погонског мотора и његову минималну и еколошку потрошњу горива, б) аутоматизација (роботизација) функција манипулатора и в) непрекидна дијагностика и мониторинг параметара система према ергономским захтевима и стандардима.

Према захтевима функција мобилних машина развијени су софтверски пакети (програмиране картице) са којима се опремају микроконтролери мекатроничких система управљања. У наставку се дају неколико примера решених захтева мекатроничким системом управљања и регулације код мобилних машина.

#### 3.1. Регулација броја обртаја

Хидростатички погонски систем затвореног кола са хидромотором 4 (сл.5а), константног специфичног



Сл.4 Општи модел мекатроничког система са компонентама за управљање мобилних машина

протока, и хидропумпом 3, променљивог специфичног протока, погођеном преко еластичне спојнице 2 дизел мотором 1, има мехатронички систем управљања и регулације који омогућује жељену континуалну промну броја обртаја  $n$  (сл.5б) излазног вратила хидромотора без обзира на број обртаја дизел мотора и оптерећење система.

Жељено управљање и регулација система је остварена микроконтролером 5, са одговарајућом програмском картицом. Улазне сигнале добијене од сензора 4.1 броја обртаја на излазном вратилу хидромотора и потенциометра 6 којим се помоћу командне ручице бира жељени број обртаја хидромотора, микроконтролер 5 обрађује одговарајућим софтвером тако да се добијају излазни сигнали за регулатор 3.1 хидропумпе и регулатор 1.1 пумпе за убрзгавање горива дизел мотора. Зависно од разлике сигнала који дају сензор 4.1 и потенциометар 6, односно зависно од разлике тренутног и жељеног броја обртаја хидромотора, микроконтролер даје сигнале регулације за промену убрзгавања горива, односно броја обртаја, дизел мотора и специфичног протока хидропумпе. При чему се оствари жељени број обртаја  $n$  (сл.5б) хидромотора, од минималне до максималне вредности, у оба смера  $R$  и  $V$  окретања, према задатом ходу командне ручице, односно према јачини струје  $I$  потениометра 6.

### 3.2. Регулација тарансмисије кретања

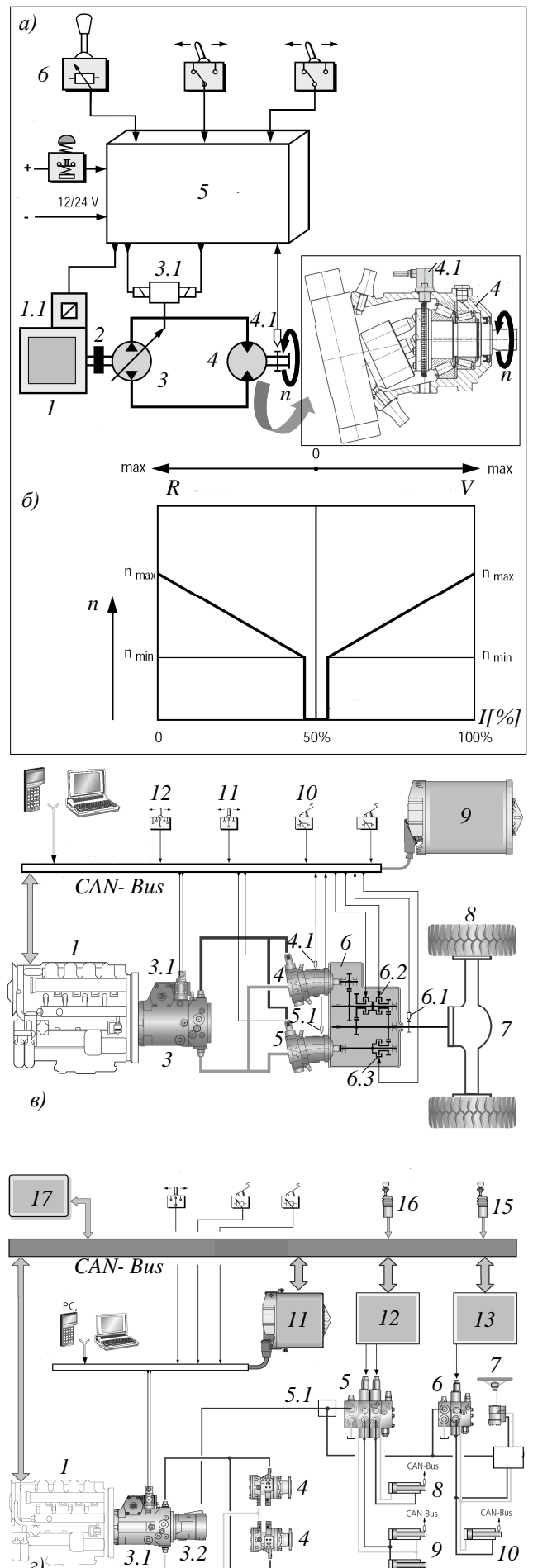
Мехатронички систем са CAN Bus магистралом се користи, поред осталог, и за управљање променом степена преноса, под оптерећењем, мењача 6 (сл.5в), на пример, код трансмисије утоваривача. Хидропумпа 3 трансмисије, погођена дизел мотором 1, напаја у затвореном колу два хидромотора 4 и 5 спојена за улазним вратилима мењача 6. Излазна вратила мењача су карданским вратилима повезана са погонским мостовима 7 за чије су бочне редукторе причвршћени тоčkови 8 кретног механизма машине.

CAN Bus магистралом микроконтролер 9 добија улазне сигнале: сензора броја обртаја и положаја педале гаса 10 дизел мотора 1, сензора 4.1 и 5.1 броја обртаја хидромотора 4 и 5, сензора 6.1 на излазном вратилу мењача, и сигнале: положаја ручице 11 за промену степена преноса мењача и положаја команде 12 смера кретања машине. Као излазне величине микроконтролер 9 даје електричне сигнале за управљање спојницама 6.2 и 6.3 мењача 6 и електрични сигнал за регулатор 3.1 хидропумпе 3 који омогућују да се под оптерећењем мењача синхронизованим укључивањем спојница и регулацијом протока хидропумпе 3, односно броја обртаја хидромотора 4 и 5, оствари непрекидна и безтрзајна промена степена преноса мењача 6 зависно од услова кретања машине и стања погона трансмисије, уз пун комфор руковаоца.

### 3.3. Синхронизација управљања

Као пример издвојн је мехатронички систем управљања виљушкар са дизел мотором 1 (сл.4.20г) који погони две хидропумпе 3.1 и 3.2 хидростатичког погонског система машине.

Хидропумпа 3.1 напаја хидромоторе 4 за погон кретног механизма. Хидропумпа 3.2 помоћу приоритетног



Сл.5 Мехатронички систем управљања мобилних машина [2][3]

вентила 5.1 напаја: а) преко главних разводника 5 и 6 са електричним активирањем, хидроцилиндре 8 и 9 за закретање рама и подизање виљушке манипулатора, б) преко сервоуправљача 7 хидроцилиндар 10 на управљачком мосту кретног механизма машине. Микроконтролером 11 се управљају и регулишу параметри трансмисије кретања машине. Микроконтролери 12 и 13 управљају и регулишу кретање манипулатора, добијајући сигнале од електронских командних разводника 14 и 15. Заједничким радом свих микроконтролера, опремљених одговарајућим софтверима, постигнуто је синхронизовано кретање и манипулисање машине уз еколошки и економични рад дизел мотора и пун комфор руковоаца.

#### 4. ЗАКЉУЧАК

Хидростатички системи са хидропумпама и хидромоторима у затвореном хидрауличком колу су нашли велику примену као погонски системи и системи управљања бројних мобилних (грађевинских, транспортних, рударских, комуналних, пољопривредних, шумских, ...) машина.

Карактеристично је да се параметри хидростатичких система коришћењем мехатроничких система управљања могу врло лако регулисати програмирањем софтвера и прилагодити потребним параметрима функција система.

Најновији модели свих врста мобилних машина имају комплетне мехатроничке системе управљања које, према захтевима, модуларно решавају и изводе специјализовани светски произвођачи [3].

Мехатроничким системима управљања код мобилних машина, поред осталог, постигнута је: а) аутоматска регулација погонских система, б) аутоматизација (роботизација) функција манипулатора и в) непрекидна дијагностика и мониторинг параметара система према ергономским захтевима и стандардима.

Рад је урађен у оквиру пројекта технолошког развоја број **035049** који финансира Министарство просвете и науке Републике Србије.

#### 5. ЛИТЕРАТУРА

[1] Јаношевић Д.: *Пројектовање мобилних машина*, Машински факултет Универзитета у Нишу, ISBN 86-80587-44-3 (COBISS.SR-ID 136572428), Свен, Ниш, 2006.

[2] Bosch Rexroth AG: *Mobile 2006*, International Mobile Hydrauliks Conference, Ulm, Elchingen, 2006.

[3] Bosch Rexroth AG: *Produktkatalog Mobilhydraulik*, Ulm, Elchingen, 2010.

## HYDROSTATIC DRIVE REGULATION ON MOBILE MACHINES

*Prof. dr Dragoslav Janosević,  
M.Sc. – Ing. Vesna Nikolić,  
Miljan Đorđević,  
Srđan Potkonjak*

*University of Nis  
Mechanical Engineering Faculty*

**Abstract:** This paper presents the results of the method analysis and criteria for regulation of hydrostatic system control for mobile machines. Observing the hydrostatic systems that form closed hydraulic circuits: a) with variable hidropump and hidromotor with constant specific flow rate, b) with hidropump and hidromotor with variable specific flow. In the comparative analysis of these variants of hydrostatic systems, the relationship between input and output parameters is observed and possibilities of systems regulation are defined. Ways to control hydrostatic system are presented through the structural analysis of mechatronic systems as the regulation signal carrier and analysis of software containing the criteria for systems control.

**Key words:** hydrostatic systems, regulation

**Адреса:**

проф. др Драгослав Јаношевић,  
Универзитет у Нишу,  
Машински факултет у Нишу,  
А. Медведева 14,  
18000 Ниш, Србија,  
[janos@masfak.ni.ac.rs](mailto:janos@masfak.ni.ac.rs)