

## СОВРЕМЕННЫЕ СПОСОБЫ ПИТАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНО РАБОТАЮЩИХ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ И УСТРОЙСТВ ГОРНЫХ, СТРОИТЕЛЬНЫХ И ДОРОЖНЫХ МАШИН

*Николай Александрович Маслов*

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, кандидат технических наук, научный сотрудник, тел. (383)205-30-30, доб. 240, e-mail: [namaslov@mail.ru](mailto:namaslov@mail.ru); Сибирский государственный университет путей сообщения, 630049, Россия, г. Новосибирск, ул. Д. Ковальчук, 191, кандидат технических наук, доцент

Рассмотрены способы питания и управления параллельно работающих гидравлических двигателей и устройств, имеющих перспективы применения в горных, строительных и дорожных машинах. Приведены схемы современных гидравлических систем машин с LS/PC (Load Sensing/Pressure Compensation) и PPPC (Proportional Priority Pressure Compensation) управлением. Выполнено сравнение способов питания и управления параллельно работающих гидродвигателей и устройств, а также схем гидросистем их реализующих.

**Ключевые слова:** экскаватор, гидравлическая система, параллельное соединение, делитель потока, регулирующий гидроаппарат, гидросистема NFC, гидросистема LS/PC, гидросистема PPPC.

## PRESENT-DAY METHODS OF POWER SUPPLY AND CONTROL OF PARALLEL OPERATING HYDRAULIC MOTORS AND DEVICES OF MINING, CONSTRUCTION AND ROAD MACHINES

*Nikolai A. Maslov*

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Ph. D., Researcher, phone: (383)205-30-30, extension 240, e-mail: [namaslov@mail.ru](mailto:namaslov@mail.ru); Сибирский государственный университет путей сообщения, 630049, Россия, г. Новосибирск, ул. Д. Ковальчук, 191, Associate Professor

Methods of power supply and control of parallel operating hydraulic motors and devices having prospects of application in mining, construction and road machines are considered. Diagrams of present-day hydraulic systems of machines with LS/PC (Load Sensing/Pressure Compensation) and PPPC (Proportional Priority Pressure Compensation) control are presented. Methods of power supply and control of parallel operating hydraulic motors and devices, as well as diagrams of hydraulic systems implementing them are compared.

**Key words:** excavator, hydraulic system, parallel connection, flow divider, control hydraulic apparatus, NFC hydraulic system, LS/PC hydraulic system, PPPC hydraulic system.

**Введение.** Рассмотрим вопрос распределения расхода между параллельными гидролиниями. Если в параллельных линиях только линейные и местные сопротивления (рис. 1, а), то между такими линиями расход распределяется обратно пропорционально их сопротивлениям. Например, если площади дросселей соотносятся как  $A_1 > A_2 > A_3$ , тогда расходы, проходящие через них:  $Q_1 > Q_2 > Q_3$ .

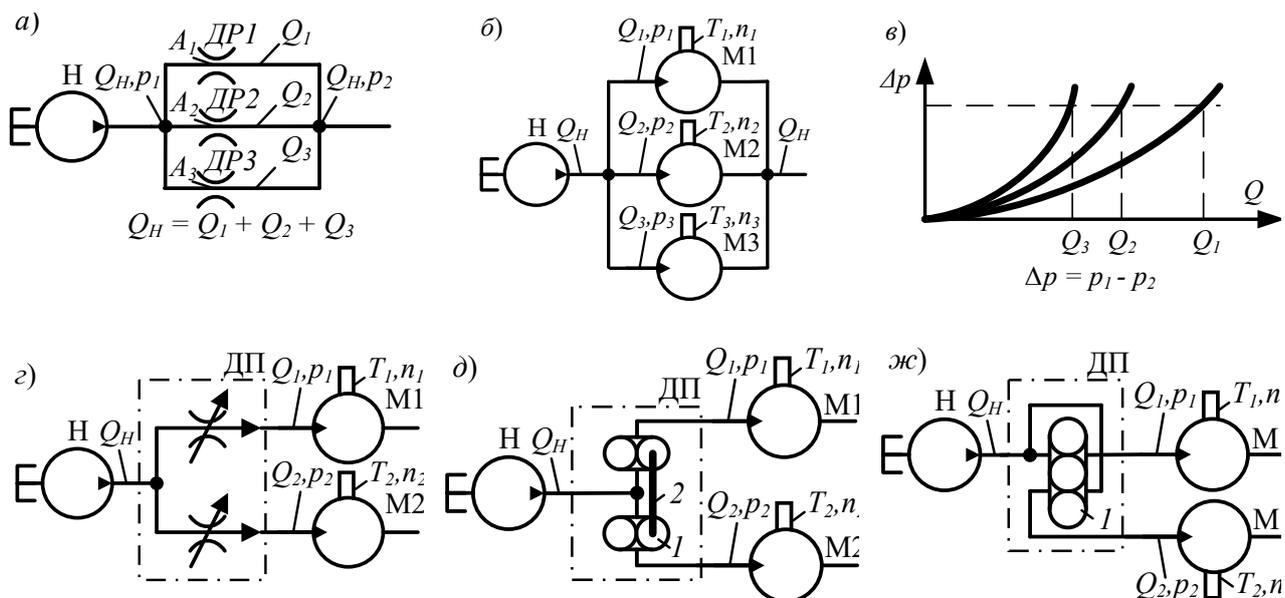


Рис. 1. Распределения расхода между параллельными гидрوليниями:

а), б) – схемы с дросселями и гидродвигателями соответственно в параллельных гидрوليниях; в) проливочные характеристики параллельных линий; г) схема с делителем потока дроссельного типа; д), ж) – схемы с вариантами исполнения делителей потока объемного типа (1 – шестерня; 2 – вал); ДП – делитель потока; ДР – дроссель; Н – насос;  $Q, p$  – расход и давление жидкости;  $T, n$  – вращающий момент и частота вращения вала;  $A$  – площадь сечения дросселя

Если в параллельных линиях только гидродвигатели, например, гидромоторы М1, М2 и М3 (рис. 1, б) и их валы нагружены вращающими моментами  $T_1 > T_2 > T_3$ , то весь расход  $Q_H$  пойдет через гидромотор М3 с меньшим моментом на валу и соответственно с меньшим необходимым давлением в его напорной линии. При этом валы других гидромоторов не вращаются. Это говорит о невозможности одновременной работы параллельно включенных гидродвигателей от одного насоса без специальных устройств деления расхода (проблема № 1). В качестве таких устройств могут быть применены, например, делители потока дроссельного [1-3] и объемного [4-6] типов и некоторые другие гидроаппараты, обычно применяемые в составе современных комплексных схемных решений. Такие решения заложены в гидросистемах машин LS/PC (Load Sensing/Pressure Compensation) и PPC (Proportional Priority Pressure Compensation) управлением.

Применение делителей потока для распределения расхода между параллельными гидрوليниями. При использовании в гидросистеме делителя (а не распределителя) потока, обеспечивается только одновременная работа всех потребителей, например, гидродвигателей или гидроударных устройств, так как при остановке или отключении одного из потребителей, остальные выключаются (проблема № 2). Это объясняется принципами действия существующих делителей потока. Принцип действия делителя потока дроссельного типа

(рис. 2, з) основан на увеличении расхода жидкости к более нагруженному и уменьшении расхода жидкости к менее нагруженному потребителю для обеспечения расхода на входе каждого потребителя в, задаваемом делителем, соотношении (чаще 1:1). Принцип действия делителя потока объемного типа (рис. 2, д, ж) основан на уменьшении расхода жидкости ко всем потребителям при повышении давления хотя бы в одной из напорных магистралей совокупности потребителей. Применение управляемого делителя потока обеспечивает параллельное соединение потребителей с или без деления потока, но не исключает проблем № 2 или № 1.

Распределение расхода между параллельными гидролиниями для обеспечения одновременной и неодновременной работы потребителей

В машинах CAT и других фирм для этих целей используют специальные схемы, например, LS/PC [7] и PPPC [8].

Компенсированные по давлению, чувствительные к нагрузке гидросистемы LS/PC. PC – pressure compensation (компенсация по давлению) – так в документации CAT названо поддержание постоянного перепада давления на золотнике распределителя. В результате при неизменной площади открытого окна остаются постоянными расход масла через распределитель и скорость гидродвигателя при изменении нагрузки. LS – load sensing (нагрузочная чувствительность) – это автоматическое поддержание давления насоса на уровне, необходимом для преодоления нагрузки на гидродвигатель, плюс запас по давлению (Margin Pressure). Гидросистемы LS/PC, сочетающие свойства PC и LS, применены в гидросистемах с закрытым центром и насосами с LS-регуляторами (например, в экскаваторах-погрузчиках и бульдозерах, в рулевом управлении многих машин). Система LS/PC позволяет одновременно работать нескольким параллельно подключенным к насосу гидродвигателям и автоматически изменять подачу регулируемого насоса в зависимости от суммы затребованных расходов и нагрузки наиболее нагруженного гидродвигателя.

**PC регулирование.** Известен регулятор потока ограничивающего типа (рис. 2, а), содержащий регулируемый дроссель ДР и клапан постоянной разности давлений КД. Перепад  $\Delta p_{ДР} = p_{ДР}^{вх} - p_{ДР}^{вых}$  на дросселе задают силой предварительного сжатия пружины клапана КД. Если  $\Delta p_{ДР} = const$ , тогда расход  $Q_{ДР}$  через дроссель зависит только от площади  $A_{ДР}$  его открытого окна. В системах PC функцию дросселя выполняет дросселирующий распределитель (рис. 2, б). Клапан постоянной разности давлений КД перед распределителем Р назван компенсатором давления. Расход  $Q_{Р}$  через распределитель (местное сопротивление) прямо пропорционален положению золотника и площади открытого окна  $A_{Р}$  распределителя Р и перепаду давления  $\Delta p_{Р}$  на золотнике. В системах PC расход  $Q_{Р}$  и скорость выходного звена гидродвигателя ГД регулируют изменением площади  $A_{Р}$  при постоянной и малой величине  $\Delta p_{Р}$ . Этим не только уменьшена потеря энергии в распределителе, но и обеспечивается требуемая скорость выходного звена гидродвигателя независимо от сопротивления движению выходного звена и давления на входе гидродвигателя.

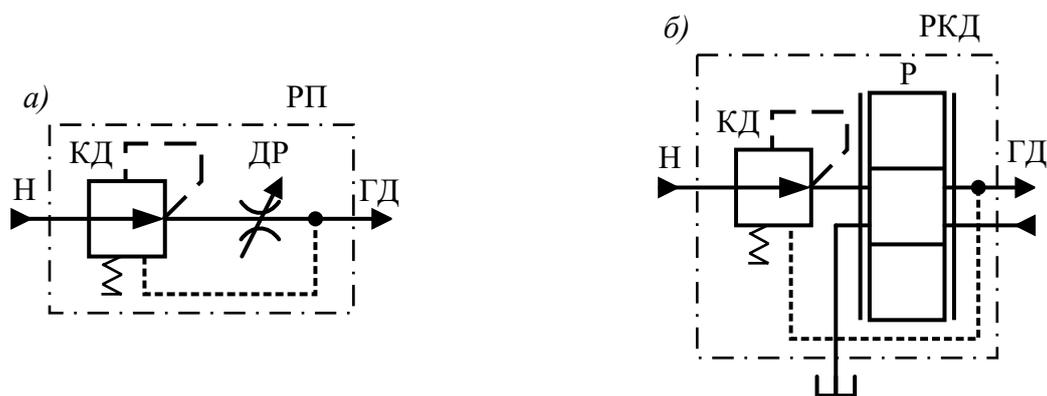


Рис. 2. Применение регуляторов потокоограничивающего типа:

а, б) – схемы с дросселем и гидрораспределителем соответственно; ГД – рабочие линии (к гидродвигателю); ДР – дроссель; КД – клапан постоянной разности давлений (компенсатор давления); Н – напорная линия (от насоса); Р – дросселирующий распределитель; РКД – распределитель с компенсатором давления; РП – регулятор потока

**LS регулирование.** Главный элемент – клапан компенсации расхода (клапан управления потоком КУП). Он поддерживает давление в напорной линии распределителей на уровне давления наиболее нагруженного гидродвигателя плюс запас по давлению, устанавливаемый его настройкой. Если подача насоса превышает сумму затребованных расходов, КУП сливает лишнюю подачу в бак. В этом смысле он управляет подачей. Управляется КУП давлениями подачи и сигнального контура. В сигнальном контуре основные логические клапаны ИЛИ сравнивают давления в линиях каждого ГД, вспомогательные логические клапаны ИЛИ сравнивают давления в линиях совокупности ГД. Наибольшее (сигнальное) давление идет на управление КУП. Клапан КУП может быть как отдельным гидроаппаратом в схемах с нерегулируемым насосом, так и входить в состав регулятора насоса в схемах с регулируемым насосом.

**LS/PC регулирование.** В технике наиболее часто применяют гидросистемы LS/PC, сочетающие свойства PC и LS. При этом, если в гидросистеме LS, PC или LS/PC насос Н нерегулируемый, то излишки расхода  $Q_H$  сливаются через предохранительный клапан КП, а это усиливает нагрев жидкости, снижает КПД и уменьшает ресурс гидропередачи (рис. 3, а). Применение в системе LS/PC регулируемого Н существенно уменьшает потери мощности (рис. 3, б) [9].

Рассмотрим численный пример.  $Q_H = 120 \text{ л/мин} = 0,002 \text{ м}^3/\text{с}$ . Регулировкой КУП установлен запас по давлению в 2 МПа. В ГД подан расход  $Q_{ГД} = 0,001 \text{ м}^3/\text{с}$  при давлении  $p_{ГД}^{ex} = 10 \text{ МПа}$ . Тогда мощность в напорной линии насоса  $P_H = 24 \text{ кВт}$ . Мощность, подведенная к гидродвигателю  $P_{ГД}^{ex} = 10 \text{ кВт}$ . Если насос нерегулируемый, то излишний  $Q_H$  будет слит через КУП в бак. Потерянная мощность  $P_{П} = 14 \text{ кВт}$  идет на нагревание жидкости. Если насос регулируемый, он уменьшит  $Q_H$  до требуемого ( $1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ ), потеря  $P_{П}$  будет минимальна и равна мощности, затрачиваемой на создание полезно используемого  $Q_H = 0,001 \text{ м}^3/\text{с}$  при давлении запаса 2 МПа, тогда  $P_{П} = 2 \text{ кВт}$ , что в семь раз меньше 14 кВт.



Основной недостаток систем LS/PC заключается в том, что если требуемый  $\Sigma Q_{ГД}^{6x}$  включенных ГД больше максимального расхода насоса  $Q_H$ , то ГД с наибольшим давлением не получает расход и останавливается. Рассмотрим численный пример. Максимальный расход  $Q_H = 100$  л/мин. Параллельно соединены три ГД с необходимыми давлениями  $p_{ГД}^{6x}$  и расходами  $Q_{ГД}^{6x}$ . При этом:  $p_{ГД1}^{6x} = 25$  МПа,  $Q_{ГД1}^{6x} = 100$  л/мин;  $p_{ГД2}^{6x} = 20$  МПа,  $Q_{ГД2}^{6x} = 70$  л/мин;  $p_{ГД3}^{6x} = 15$  МПа,  $Q_{ГД3}^{6x} = 30$  л/мин. Тогда поток жидкости будет доступен только гидродвигателям ГД2 и ГД3, которые оказывают наименьшее сопротивление потоку, а ГД1 остановится.

Еще один недостаток систем LS/PC заключается в том, что если в одной из рабочих линий  $p$  приблизится к  $p_{КП\ max}$  на величину настройки КУП, откроется КП, пропустит на слив расход, затребованный перегруженным ГД, который остановится.

Для устранения существующих недостатков разработана гидросистема РРРС.

Пропорциональные приоритетные с компенсацией давления гидросистемы РРРС. В аббревиатуре РРРС три части: Р (Proportional) – пропорциональная; Р (Priority) – приоритетная (приоритет гидропривода рабочего оборудования над гидроприводом ходового оборудования машины); РС (Pressure Compensation) – с компенсацией давления. Общие свойства с гидросистемой LS/PC: применение РРРС (аналогично LS/PC) – гидроприводы с закрытым центром и совместно работающими гидродвигателями, запитанными от общего насоса; по свойствам РС и LS гидросистема РРРС аналогична гидросистеме LS/PC с регулируемым насосом (обеспечивает постоянство скорости ГД при изменении нагрузки и автоматически увеличивает  $Q_H$  при увеличении  $Q_{ГД\ треб}$ ). Отличия гидросистемы РРРС от LS/PC: компенсаторы давления выполнены в виде дросселирующих клапанов КО, встроенных в питающие линии внутри распределителей; компенсаторы давления делят расход насоса между всеми гидродвигателями пропорционально положению золотников распределителей; если  $Q_H < \Sigma Q_{ГД\ треб}$ , она делится между гидродвигателями пропорционально площадям окон распределителей, скорости всех гидродвигателей уменьшаются, ни один не останавливается. Системы РРРС применены в машинах: погрузчики с телескопической стрелой; погрузчики; автогрейдеры; колесные и гусеничные экскаваторы [8]. Управление распределителями – «любое» (мускульное, гидравлическое, электрическое, электрогидравлическое, электрогидравлическое пропорциональное). Элементы системы РРРС: дросселирующие распределители; компенсаторы давления КО; сигнальный контур давления в рабочих линиях гидродвигателей; регулируемый насос Н с клапанами управления потоком КУП и ограничения давления КОД. КО регулирует  $Q_P$  в зависимости от давлений:  $p_{КО\ max}$  настройки пружины КО;  $p_{у\ сиз}$  управления в сигнальном контуре;  $p_{у^{n.l}}$  в питающей линии ( $p_{у^{n.l}} \approx p_H$ ). Давление  $p_{ци}$  или  $p_{ц}^{6x}$  меньше  $p_{у^{n.l}}$  на  $\Delta p = \Delta p_{КО} + \Delta p_P$ .

Рассмотрим численный пример. На рис. 3, в цифрами обозначены давления в мега Паскалях (МПа) без учета  $\Delta p_P$  на золотниках распределителей. Расход  $Q_H$  достаточен. Пружины в клапанах КО1 и КО2 удерживают давление 2 МПа.

Давление в рабочих линиях гидроцилиндров Ц1 и Ц2 равны 20 и 10 МПа соответственно. В сигнальном контуре давление равно 20 МПа. Если на входе в Ц2 и выходе КО2 давление 10 МПа, тогда КО2 давлением в сигнальном контуре 20 МПа и пружиной (2 МПа) закроется настолько, что сопротивление КО2 увеличится до 12 МПа, а давление в питающей линии станет 22 МПа. Если:  $p_{y^{sig.k}} > p_{y^{п.л.}}$ , т. е.  $p_{y^{sig.k}} > p_H$ , то нагрузка на другие ГД увеличилась или нагрузка на данный ГД уменьшилась. Тогда: КО несколько прикрывается; сопротивление питающей линии увеличилось;  $Q_P$  и скорость данного ГД уменьшились. Если:  $p_{y^{sig.k}} < p_{y^{п.л.}}$ , т. е.  $p_{y^{sig.k}} < p_H$ , то нагрузка на другие ГД уменьшилась или нагрузка на данный ГД увеличилась. Тогда: КО несколько приоткрывается; сопротивление питающей линии уменьшилось;  $Q_P$  и скорость данного ГД увеличились. Таким образом, компенсаторы КО при изменении разности давлений в сигнальном контуре и питающих линиях изменяют сопротивления в шунтирующих линиях распределителей и перераспределяют подачу насоса между ГД пропорционально положениям золотников (свойство пропорциональности).

Выполнено сравнение гидросистем LS/PC и PPPC. Результаты сравнения приведены в таблице.

**Заключение.** Наиболее гарантированное обеспечение одновременной и не одновременной работы потребителей, работающих при разных или одинаковых нагрузках, обеспечивается современной гидросистемой PPPC. Если нагрузки одинаковы и перепады давления на потребителях одинаковы, то работоспособна наиболее простая параллельная схема соединения потребителей с источником расхода. При разных нагрузках и одновременной работе потребителей целесообразно применение делителей потока. Альтернативным является вариант запитывания потребителей от разных источников расхода. Такой вариант реализован, например, в гидросистеме NFC (NegativeFlowControl) некоторых экскаваторов [10, 11].

#### Достоинства и недостатки гидравлических систем LS/PC и PPPC

Гидросистема	Достоинства	Недостатки
LS/PC. Насос с постоянным расходом или регулируемый	<p>1. Компенсация по давлению (PC) – поддержание <math>\Delta p</math> на золотнике P, <math>Q_P</math> и скорости ГД, независимо от нагрузки ГД и <math>p_{ГД}^{ex}</math>. Это свойство обеспечивают клапан КД и дросселирующий распределитель P.</p> <p>2. Чувствительность к нагрузке (LS) – обеспечение заданного превышения давления на выходе насоса по сравнению с максимальным рабочим давлением. Это достигается применением регулятора расхода и дросселированием излишка жидкости в Б, если Н нерегулируемый, или изменением <math>Q_H</math> регулируемого Н</p>	<p>1. Останавливается наиболее нагруженный ГД, если: <math>p_{ГД}^{ex} = p_{КПmax}</math> или <math>Q_{ГДtreб} &gt; Q_{Hmax}</math></p> <p>2. Большие потери энергии на дросселирование излишка жидкости, нагрев жидкости, низкий КПД гидросистемы с нерегулируемым насосом. При использовании регулируемого насоса потери энергии уменьшаются в несколько раз</p>

Гидросистема	Достоинства	Недостатки
РРРС. Насос регулируемый	<p>1. Возможность питания одним Н нескольких ГД.</p> <p>2. Скорость ГД не зависит от нагрузки, пока <math>Q_H &gt; \sum Q_{ГД\text{ треб.}}</math>.</p> <p>3. Если <math>Q_H &lt; \sum Q_{ГД\text{ треб.}}</math>, то насос выходит на <math>Q_{H\text{ max}}</math>. Если <math>Q_H^{\text{max}}</math> недостаточно, то совокупность КО и золотников Р разделит ее между всеми ГД пропорционально положениям золотников. При этом скорость всех ГД уменьшится. Ни один ГД не остановится.</p> <p>4. Нет слива излишков, чрезмерного нагревания жидкости и снижения КПД привода.</p> <p>5. Если давление одного из ГД (давление в сигнальном контуре) приблизится к допустимому давлению <math>p_H</math> на величину настройки КОД в регуляторе насоса, насос переводится на <math>Q_H \approx 0</math>, т. е. насос и дизель разгружены.</p>	<p>1. Сложность схемы;</p> <p>2. Недостаточная чувствительность управления.</p>

Работа выполнена в рамках проекта ФНИ № гос. регистрации АААА-А17-117122090003-2.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Свешников В.К. Станочные гидроприводы: Справочник. – М., 2008. – 640 с.
2. Васильченко В.А. Гидравлическое оборудование мобильных машин: Справочник. – М., 1983. – 301 с.
3. RE 64592. Traction module (Flow divider) RTM. Технические данные. Bosch Rexroth AG. 2016. – 22 с.
4. 86.00:00.000-01 ТО. Кран укладочный УК-25/9-18. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. 2004. – 121 с.
5. Попович М.В. и др. Путьевые машины. М., «Транспортная книга», 2009. – 819 с.
6. ЦПО-3.2000. Типовая инструкция по техническому обслуживанию гидрооборудования железнодородно-строительных машин – М.: ПТКБ ЦП МПС, 2001. – 167 с.
7. RENR3914-01. D9R Track-Type Tractor Hydraulic System. Schematic. Caterpillar. January 2005. – 24 с.
8. RENR7366-01. 385C Excavator Hydraulic System. Schematic. Caterpillar. August 2008. – 24 с.
9. RRS 92 711/03.00. Насос регулируемый A10VSO для открытых систем. Технические данные. Brueninghaus Hydromatik GmbH. 2000. – 40 с.
10. RRS 93 010/10. Аксиально-поршневой регулируемый сдвоенный насос A8V0. Технические данные. Bosch Rexroth AG. 2005. – 32 с.
11. RENR7296-03. 320D & 320D L Excavator Hydraulic System Schematic. Caterpillar. July 2007. – 16 с.