

СИСТЕМАТИЗАЦИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТЕХНИЧЕСКОГО УРОВНЯ СОВРЕМЕННЫХ АКСИАЛЬНО-ПОРШНЕВЫХ ГИДРОМАШИН

SYSTEMATIZATION OF THE INDICATORS OF THE TECHNICAL LEVEL OF MODERN AXIAL-PISTON HYDRAULIC MACHINES

Установлена номенклатура показателей качества типовых конструкций гидромашин, которая является основой для объективного, многоуровневого отображения и оптимизации служебных свойств, а также фундаментом для разработки универсальных методов математического и компьютерного исследований таких объектов. Разработана многоуровневая квалиметрическая модель для определения технического уровня аксиально-поршневых гидромашин.

Ключевые слова: аксиально-поршневые гидромашин, номенклатура, технические характеристики, квалиметрическая модель.

Введение

Требования потребителей по улучшению технико-экономических показателей аксиально-поршневых гидромашин (аксиально-поршневых гидромашин) путем уменьшения их габаритов, массы и энергоемкости при одновременном увеличении быстродействия и надежности приводят к увеличению рабочего давления, возрастанию динамических нагрузок и виброактивности [1, 7]. Производство аксиально-поршневых гидромашин, как наукоемкой продукции машиностроения, связано со значительными затратами и рисками, для сокращения которых еще на ранних стадиях проектирования наиболее эффективным является анализ альтернативных вариантов конструкций, их обоснованный отбор и оптимизация конкретных решений на математических и компьютерных моделях, а также проведения на этих моделях целевых исследований, которые заменяют натурные испытания. Поэтому работа по систематизации показателей технического уровня аксиально-поршневых гидромашин является актуальной и необходимой для потребностей современного машиностроения.

Цели и задачи исследований

В настоящее время применение гидроприводов в машиностроении отличается массовостью и все возрастающими требованиями по повышению качества и технического уровня. Известно более 600 близких по техническим характеристикам и назначениям серийных конструкций объемных аксиально-поршневых гидромашин модульного построения. В частности, на ЧАО «Стройгидравлика» (Одесса, Украина) выпускают: насосы регулируемые однопоточные 311.224.М.А. и двухпоточные 321.224.М.А, гидромотор регулируемый с

наклонным БЦ 403.112.1-00, гидромоторы и гидронасосы нерегулируемые со сферическим ТР 410.56; 410.112; 310.224. [4]. Кроме того, на ЧАО «Гидросила АПМ» (Кировоград, Украина) выпускают регулируемые аксиально-поршневые насосы (аксиально-поршневые насосы) серий S и H-PVS90 и PVH112 (НП90, НП112) [5]. Продукция этих предприятий широко используется в трансмиссиях мобильных машин — зерноуборочных и других комбайнах, гидроприводах технологического оборудования, автобетоносмесителях, дорожных уплотнителях и прочих строительно-дорожных машинах.

Ведущими мировыми изготовителями гидрооборудования являются фирмы: «Rexroth» (ФРГ), «Eaton», «Cessna», «Vickers», «Parker» (США), «Danfoss» (Дания), «Комatsu» (Япония), «SAI» (Италия), «HAGGLUNDS» (Швеция) и «POCLAIN» (Франция) [1].

Исследованию функциональных свойств аксиально-поршневых гидромашин и улучшению их характеристик уделено достаточное количество научных работ [1, 3, 6, 7]. На основе исследований основных оценочных показателей технического уровня гидромашин выявлены четыре конструктивные группы по увеличению скоростных возможностей: радиально-поршневые многократного действия, героторные и радиально-поршневые однократного действия, шестеренные и аксиально-поршневых гидромашин [7]. Наименьшие показатели удельной мощности среди существующих гидромашин выявлены в аксиально-поршневых гидромашин на уровне $0,007—0,02 \text{ кг/кВт}$ [6].

Наблюдается устойчивая тенденция форсирования давления рабочей жидкости в аксиально-поршневых гидромашин. За последние 30 лет уровень номинального давления рабочей жидкости в гидромашин повысился от 10 до 40–50 МПа и продолжает повышаться [3].

До настоящего времени отсутствуют работы по систематизации технических характеристик аксиально-поршневых гидромашин, что не способствует выбору оптимального варианта конструкции аксиально-поршневых гидромашин, его использования и модернизации по групповым и комплексным показателям функциональных возможностей, надежности, энергосбережения и др.

Целью настоящего исследования является систематизация технических характеристик аксиально-поршневых гидромашин по групповым показателям служебных свойств. Номенклатура показателей качества аксиально-поршневых гидромашин является основой для объективного, многоуровневого и всестороннего отображения служебных свойств основных частей конструкции, а также фундаментом для разработки универсальных методов математического и компьютерного исследований и многокритериальной оптимизации служебных свойств таких объектов.

Основная часть

Объемная аксиально-поршневых гидромашин представляет собой роторную машину с вращательным движением ротора и возвратно-поступательным движением поршней (обычно 7–9). Ось вращения ротора с осями поршней может составлять угол от 0 до 45°. Различают 2 основных типа конструкции аксиально-поршневых гидромашин [2, 3]:

- с наклонным диском (ось вращения блока цилиндров (БЦ) совпадает с осью вращения вала), угол наклона $\xi = 18\text{--}22^\circ$ на рисунке 1, а;
- с наклонным блоком (ось вращения блока цилиндров располагается под углом ξ к оси вращения вала), угол наклона $\xi = 20\text{--}45^\circ$ на рисунке 1, б.

Кроме того, АПМ характеризуются конструкцией распределителя: сферический торцевой распределитель (СТР); дисковый распределитель (ДР); линзовый распределитель (ЛР).

Одной из главных технических характеристик аксиально-поршневых гидромашин, как и любого другого изделия машиностроения, является общий КПД

$$\eta = \eta_M \cdot \eta_0, \quad (1)$$

где η_M и η_0 — механический и объемный КПД.

Механический КПД характеризует механические потери совместно работающих поверхностей аксиально-поршневых гидромашин: в подшипниках, поршнях, уплотняющих кольцах и других узлах, где происходит трение деталей.

Объемный КПД характеризует утечки рабочей жидкости через зазоры и щели между деталями гидромашин и определяется отношением фактического расхода рабочей жидкости к теоретическому расходу (подаче).

$$\eta_0 = Q_\phi / Q_T, \quad (2)$$

Среди современных аксиально-поршневых гидромашин наивысшие показатели общего КПД обеспечивают конструкции аксиально-поршневых гидромашин схемы «Тримот» в сериях регулируемых гидромашин 300 ($\eta_0 = 0,9$), с наклонным распределительным диском серии 40 модели M35MV, AP2D36 ($\eta_0 = 0,92$) и др. [6, 7].

Основной технической характеристикой функционирования аксиально-поршневых гидромашин является номинальное давление рабочей жидкости, от которого зависят почти все остальные функциональные показатели. Статистический анализ эксплуатации свидетельствует, что значительная часть аксиально-поршневых гидромашин (55 %) имеет давление 25 МПа, 35% — 40 МПа, 10% — 60 МПа.

Высокое номинальное давление рабочей жидкости (до 50 МПа и выше) имеют аксиально-поршневые гидромашинки серии 90M42 фирм *Danfoss*, *A6VM Rexroth*, *V14 Parker* [1]. В гидромашине производства ЧАО «Стройгидравлика» (Одесса) и ЧАО «Гидросила» (Кировоград АПМ) применяется номинальное давление рабочей жидкости не выше 20–25 МПа [4, 5].

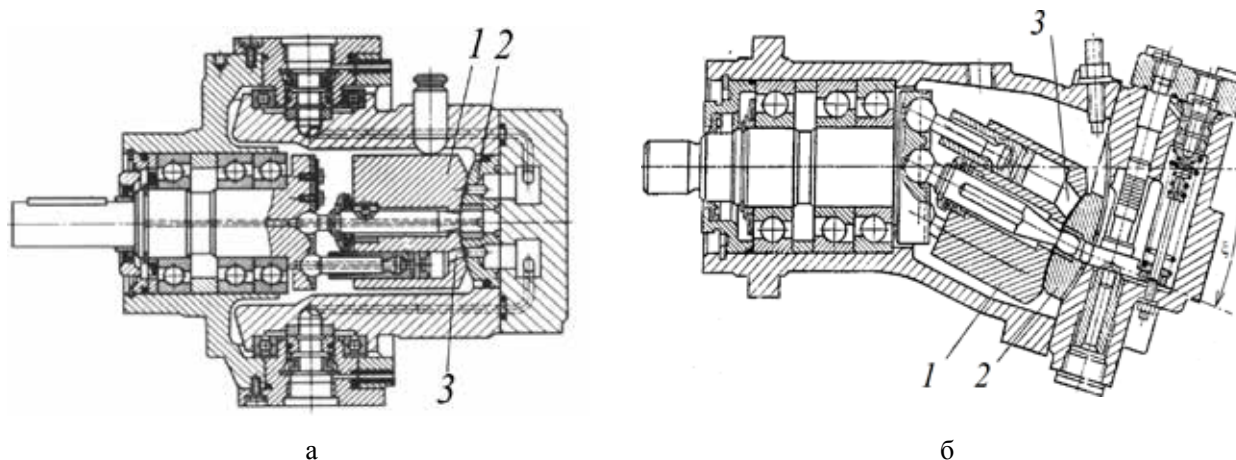


Рисунок 1 — Регулируемые аксиально-поршневых гидромашин: а — с распределителем в поворотной люльке; б — с линзовым распределителем, схема «Тримот»; 1 — блок цилиндров; 2 — распределитель; 3 — рабочая камера

В период разгона и торможения элементов гидропривода в аксиально-поршневых гидромашинах возникают пиковые значения давлений рабочей жидкости, которые могут значительно (в 1,5 раза) превышать номинальные значения давлений жидкости (иногда даже достигают $p_{\max} = 70 \text{ МПа}$).

Действительная производительность насоса Q_{ϕ} меньше теоретической, так как возникают утечки, из-за несвоевременного закрытия клапанов, негерметичности в клапанах и уплотнениях поршня, а также неполноты заполнения рабочей камеры. Максимальная подача аксиально-поршневых гидромашин характеризует теоретическую подачу, которая зависит от частоты вращения и определяется по формуле [2, 3]

$$Q_T = V \cdot n, \quad (3)$$

где V — максимальный рабочий объем аксиально-поршневых гидромашин; n — частота вращения вала.

Для множества серийных конструкций аксиально-поршневых гидромашин значение максимальной подачи колеблется в широких пределах: от 63 до 700 л/мин [1].

Рабочий объем аксиально-поршневых гидромашин зависит от конструктивных параметров машины и определяется по формуле

$$V = D_z \frac{\pi d^2}{4} \operatorname{tga}, \quad (4)$$

где D — диаметр окружности, на которой расположены поршни в роторе; d — диаметр поршня, z — число поршней; α — угол наклона шайбы.

Одной из важных технических характеристик аксиально-поршневых гидромашин является коммутационная частота, которая характеризует виброактивность гидромашин в составе гидропривода машинного агрегата и определяется по формуле

$$f_k = 2nz / 60, \quad (5)$$

Вибростойкость распределительного узла зависит не только от виброактивности аксиально-поршневых гидромашин, но и от первой основной частоты распределителя ω_1 , которую также можно считать одной из важных технических характеристик аксиально-поршневых гидромашин. Исследование главных частот различных конструкций распределителя выполнено с использованием метода конечных элементов в работе [3].

Силовым параметром аксиально-поршневых гидромашин является максимальный крутящий момент на валу машины, который определяется по формуле [1]

$$M_{kz} = 0,159 \cdot V \cdot \Delta p, \quad (6)$$

где Δp — перепад давлений, МПа.

Одна из основных технических данных аксиально-поршневых гидромашин это номинальная мощность

$$P = Q_T \Delta p \eta_M / 600, \quad (7)$$

Для большинства потребителей аксиально-поршневых гидромашин наиболее важным является показатель долговечности, который для серийных конструкций колеблется в пределах от 1500 до 12000 ч и зависит от условий работы и режимов нагружения оборудования, в котором используются аксиально-поршневые гидромашин.

Технической характеристикой аксиально-поршневых гидромашин является ее масса без учета массы рабочей жидкости.

Конструктивной характеристикой является характеристический размер аксиально-поршневых гидромашин [7]

$$L_{\text{хар}} = \sqrt{d \cdot l}, \quad (8)$$

где d и l — диаметр и длина гидромашин.

Основные технические характеристики серийных конструкций аксиально-поршневых гидромашин, производимых в Украине, сведены в таблицу 1.

Диапазоны изменения значений показателей соответствующих технических характеристик аксиально-поршневых гидромашин определены на основании анализа паспортных данных, результатов опубликованных научных исследований и опыта эксплуатации гидромашин в производственных условиях [1, 2, 4, 6, 7].

Из общего анализа технических характеристик следует, что для производимых в Украине аксиально-поршневых гидромашин резервы повышения технического уровня выявлены в следующем: возможность повышения давления рабочей жидкости; изменение первой главной частоты распределителя; увеличение долговечности и крутящего момента.

На основе анализа требований потребителей гидрофицированного оборудования и выводов экспертов по действующим серийным конструкциям аксиально-поршневых гидромашин, документации производителей узлов и модулей в составе аксиально-поршневых гидромашин и результатов исследований характеристик (1)–(8) аналогичных конструкций, установлена номенклатура показателей качества типовых конструкций, которая приведена в таблице 2.

Критерий эффективности аксиально-поршневых гидромашин предложено определять [7] по формуле

$$k_r = \frac{60 M_{kp} n T}{g m L_{\text{хар}} f_m}, \quad (9)$$

где M_{kp} — максимальный крутящий момент, Н•м; n — номинальная частота вращения вала гидромашин, мин⁻¹; T — долговечность аксиально-поршневых гидромашин, ч; m — масса гидромашин (без учета массы рабочей жидкости), кг; $L_{\text{хар}}$ — характеристический размер гидромашин, м; $f_m = 10^8$ — безразмерный коэффициент.

Критерий быстроходности аксиально-поршневых гидромашин характеризуется частотой вращения блока цилиндров, и рабочим объемом гидромашин и

Таблиця 1
Технические характеристики серийных конструкций аксиально-поршневых гидромашин,
производимых на украинских предприятиях

Показатель	Обозначение показателя	Диапазон определения значений показателя	Модель 1	Модель 2	Модель 3
КПД общий	$\eta = \eta_M \cdot \eta_0$	0,83—0,95	0,9	0,92	0,86
КПД механический	η_M	0,87—0,94	0,95	0,96	0,91
КПД объемный	$\eta_0 = Q_\Phi / Q_T$	0,9—0,965	0,95	0,94	0,94
Давление Н: номинальное, МПа	p_H	16—58	25	25	42
Пиковое давление, МПа	p_{max}	40—70	40	40	45
Максимальная подача, л/мин	$Q_T = V \cdot n$	63—700	319	206	391,6
Максимальный рабочий объём, см ³	$V = Dz(\pi d^2/4)tg\alpha$	28—280	112	224	110,8
Коммутационная частота, кГц		7,1—151,8	7,54	7,54	35,0
Главная частота распределителя, кГц		3,5—12,1	12,028	4,095	5,885
Максимальный крутящий момент, Н•м		17—5565	332	688	284
Номинальная мощность, кВт		15—915	42	84	199,8
Частота вращения блока цилиндров номинальная, мин-1		1200—6900	1200	1200	2500
Долговечность АПГ, ч		1500—12000	5000	5000	2000
Масса (без РЖ), кг		15—230	40	86	85
Характеристический размер АПГ, см					

Примечание:

Модель 1 — регулируемая гидромашинка 403.112 схема «Тримот», производства ЧАО «Стройгидравлика»;

Модель 2 — нерегулируемая гидромашинка со сферическим торцовым распределителем, производства ЧАО «Стройгидравлика»;

Модель 3 — нерегулируемые гидромашинки с наклонным распределительным диском, а также гидромотор НП112, производства ЧАО «Гидросила».

Свойство	Критерии технического уровня	Обозначение
1. Функциональная эффективность	1.1. Критерий эффективности	$k_r = \frac{60 M_{кр} n T}{g m L_{кр} f_n}$
	2.1. Критерий быстроходности	$k_n = n \cdot V^{1/3}$
2. Быстродействие	2.2. Теоретический расход	$Q_T = nV$
	3.1. Удельная мощность	$k_p = P/m$
3. Энергоемкость	3.2. Коэффициент компактности	$k_k = p_H / V_0$
	3.3. Общий КПД	$\eta = \eta_M \cdot \eta_0$
	4.1. Коммутационная виброактивность /60	$f_k = 2 n z$
4. Вибронагружение /60	4.2. Удельный крутящий момент	$k_M = M_p / m$
	4.3. Вибростойкость подсистемы	$k_{\omega} = 2 n z / (60 \omega_1)$
	4.4. Коэффициент допустимой перегрузки	$k_{exp} = \frac{P_{max}}{[n_{\sigma}] P_H}$
	5.1. Нарботка на отказ АПГ	$T = n_{\phi} L_0 / n$
5. Надежность	5.2. Коэффициент готовности	$k_T = T / (T + T_0)$
	5.3. Усредненный ресурс приводного узла	T_{cp}
	5.4. Вероятность безотказной работы распределителя	$P_{тр}$
	5.5. Вероятность безотказной работы «слабых» элементов гидромашины	$P_{сз}$



Рисунок 2— Схема квалиметрической модели технического уровня аксиально-поршневого гидропривода

определяется по формуле [7]

$$k_p = n \cdot V^{1/3}, \quad (10)$$

Удельную мощность k_p и коэффициент компактности k_k аксиально-поршневых гидромашин, характеризующие энергоемкость, предложено определять в виде

$$k_p = P/m; \quad k_k = p_n / V, \quad (11)$$

где m — масса аксиально-поршневых гидромашин; p_n — номинальное давление рабочей жидкости.

Удельный крутящий момент аксиально-поршневых гидромашин может быть представлен в виде максимального крутящего момента, приходящегося на единицу массы гидромашин

$$k_M = M_{кр} / m \quad (12)$$

Вибростойкость подсистемы распределителя аксиально-поршневых гидромашин, зависящую от соотношения показателя коммутационной виброактивности и первой главной частоты распределителя, предложено учитывать в виде следующего критерия

$$k_{\omega} = 2\pi n z / (60 \omega_1) \quad (13)$$

Коэффициент допустимой перегрузки гидромашин предложено определять как соотношение допустимого максимального (пикового) давления в гидравлической системе к номинальному (расчетному) давлению

$$k_{exp} = \frac{P_{max}}{[n_{\sigma}] p_i}. \quad (14)$$

Соответствующие групповые показатели служебных свойств функционирования аксиально-поршневых гидромашин изображены в виде вершин дерева, образами которых являются единичные показатели в виде предложенных критериев, представленных на рисунке 2.

Наработку аксиально-поршневых гидромашин на отказ предложено определять по формуле

$$T = n_{\phi} L_0 / n, \quad (15)$$

где n и n_{ϕ} — номинальная и усредненная рабочая частоты вращения блока цилиндров; L_0 — долговечность,

гарантируемая производителем при эксплуатации гидромашин на номинальных режимах.

Коэффициент готовности характеризуется наработкой аксиально-поршневых гидромашин на отказ и средним временем T_0 восстановления после отказа

$$k_T = T / (T + T_0), \quad (16)$$

Для оценки показателей надежности подсистем аксиально-поршневых гидромашин выбраны: усредненный ресурс приводного узла $T_{ср}$, вероятность безотказной работы распределителя $P_{тр}$, вероятность безотказной работы «слабых» элементов РСЭ. В результате анализа «слабыми» элементами аксиально-поршневых гидромашин выявлены конструктивные параметры распределителя: форма и размеры скосов всасывающего и нагнетающего окон, толщина перешейка окна, толщина ТР и др.

С учетом полученной информации были разработаны предложения по усовершенствованию конструкции распределителей, что позволит повысить технический уровень отечественных аксиально-поршневых гидромашин.

Выводы

Предложенная номенклатура показателей качества состоит из 15 единичных критериев и характеризует пять основных групповых свойств функционирования типовых конструкций аксиально-поршневых гидромашин.

Номенклатура показателей качества аксиально-поршневых гидромашин является основой для объективного, многоуровневого и всестороннего отображения служебных свойств конструкций и составляет фундамент для определения технического уровня конкретной гидромашин на стадии проектирования и при модернизации.

Литература

1. Аврунин, Г.А. Анализ современного технического уровня объемных гидropередач для мобильных машин / Г.А. Аврунин, И.И. Мороз, С.В. Поникаровская, А.С. Чирочкин // Вестник ХНАДУ. — Харьков. — 2007. — вып. № 38. — С. 3—6.
2. Аврунин, Г.А. Объемный гидропривод. Аксиально-поршневые гидромашин / Г.А. Аврунин // Промышленность в Фокусе. — К., 2013. — №1 (1). — С. 52—54.
3. Жеглова, В.М. Повышение энергетической эффективности роторно-поршневых гидромашин путем численно-аналитического моделирования распределителя / В.М. Жеглова, И.В. Николенко, Ю.М. Хомяк // MOTROL. — Люблин, 2009, v.11A. — С.162—168.

4. Каталог продукции на ЧАО «Стройгидравлика» (Одесса, Украина). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://stroygidravlika.com.ua/files/Catalog.pdf>.

5. Каталог продукции на ЧАО «Гидросила». [Электронный ресурс]. (Кировоград, Украина) Режим доступа: <http://www.hydrosila.com/products/>.

6. Кулешков, Ю.В. Перспективы повышения технического уровня шестеренных насосов / Ю.В. Кулешков, Т.В. Руденко, М.В. Красота, В.В. Русских, К.Ю. Кулешкова // Конструювання, експлуатація та виробництво сільськогосподарських машин. — Кировоград, 2012. — Вып. 42, част. I. — С. 161—168.

7. Шевцов, В.М. Оценка технического уровня объемных гидромашин / В.М. Шевцов, Г.А. Аврунин // Вестник НТУ «ХПИ». Сб. науч. тр. — Харьков. — 2011. — С. 59—63.

Reference

1. Avrunin, G.A. Analiz sovremennogo tekhnicheskogo urovnya obyomnykh gidroperedach dlya mobilnykh mashyn / G.A. Avrunin, I.I. Moroz, S.I. Ponikarovskaya, A.S. Chirochkin // Vestnik KHNADY. — Kharkov, 2007. — Вып. №38. — С. 3—6.
2. Avrunin, G.A. Obyomnyi gidroprivod. Aksialno-porshnevye gidromashyny / G.A. Avrunin // Promyshlennost v Fokuse. №1 (1). — K., 2013. — S. 52—54.
3. Zheglava, V.M. Povyshenie energeticheskoy effektivnosti rotornno-porshnevnykh gidromashyn putiom chislenno-analicheskogo modelirovaniya raspredelatelya. / V.M. Zheglava, I.V. Nikolenko, Yu.M. Khomiak // MOTROL -Lublin, 2009, v.11A. — S.162—168.
4. Katalog produktsii na CHAO «Stroygidravlika» (Odesa, Ukraina). Elektronnyy resurs. Rezhym dostupa: <http://stroygidravlika.com.ua/files/Catalog.pdf>.
5. Katalog produktsii na CHAO «Gidrosila» (Kirovograd). Elektronnyy resurs. Rezhym dostupa: <http://www.hydrosila.com/products/>.
6. Kuleshkov, Yu.V. Perspektivy povysheniya tekhnicheskogo urovnya shesterenykh nasosov / Yu.V. Kuleshkov, T.V. Rudenko, M.V. Krasota, V.V. Russkih, K.Yu. Kuleshkova // Konstruyuvannya, eksplyatatsiya ta vyrobnyctvo silskogospodarskykh mashyn, vyp. 42, chast . — Kirovograd, 2012. — S. 161—168.
7. Shevcov, V.M. Otsenka tekhnicheskogo urovnya obyomnykh hidromashyn / V.M. Shevcov, G.A. Avrunin // Vestnik NTU «KHPI» sb. naych. tr. — Kharkov, 2011. №18. — S. 59—63.

УДК 621.255.2

Систематизация показателей технического уровня современных аксиально-поршневых гидромашин

**В.П. Яглинский,
В.Н. Тихенко,
В.М. Жеглова**

Установлена номенклатура показателей качества типовых конструкций гидромашин, которая является основой для объективного многоуровневого отображения и оптимизации служебных свойств, а также фундаментом для разработки универсальных методов математического и компьютерного исследований таких объектов. Разработана многоуровневая квалиметрическая модель для определения технического уровня аксиально-поршневых гидромашин.

Ключевые слова: аксиально-поршневые гидромашины, номенклатура, технические характеристики, квалиметрическая модель.

UDK 621.255.2

Systematization of the indicators of the technical level of modern axial-piston hydraulic machines

**V.P. Yaglinsky,
V.N. Tykhenko,
V.M. Zheglova**

The nomenclature of quality indicators of the typical structures of hydraulic machines is determined. This nomenclature is the basis for the objective multilevel displaying and optimization of the service properties as well as the foundation for the development of the universal methods of mathematical and computer studies of such objects. The qualimetric multilevel model for determining the technical level of the axial-piston hydraulic machines is developed.

Keywords: axial-piston hydraulic machines, nomenclature, specifications, qualimetric model.