

DOI: 10.15393/j2.art.2021.5983

УДК 66.15.01

Статья

Классификация форвардеров с использованием кластеризации данных об их эксплуатационных характеристиках

Андронов Александр Вячеславович

кандидат технических наук, Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова (Российская Федерация), andronovalexandr@gmail.com

Петросян Сергей Суменович

соискатель, Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова (Российская Федерация), tr_mlk@spbstu.ru

Егорин Александр Анатольевич

соискатель, Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова (Российская Федерация), lesbisnes@mail.ru

Ильюшенко Дмитрий Александрович

кандидат технических наук, Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова (Российская Федерация), dilium@yandex.ru

Хитров Егор Германович

доктор технических наук, Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова (Российская Федерация), yegorkhitrov@gmail.com

Получена: 18 октября 2021 / Принята: 22 ноября 2021 / Опубликовано: 23 ноября 2021

Аннотация: Изучены сведения о грузоподъёмности, массе, мощности двигателя, энергонасыщенности, номинальном давлении на грунт восьмиколёсных форвардеров, предлагаемых производителями техники Gremo, HSM, Komatsu, Logset, Rottne, John Deere, Ponsse, Caterpillar, Tigercat, Timberpro. Для анализа данных использован метод k -средних кластеризации данных. В результате выделено 6 классов машин. Класс особо лёгких форвардеров, грузоподъёмность машин 7—10 т, масса 11—15 т; мощность двигателя 120—130 кВт, повышенный коэффициент энергонасыщенности в пределах 56,5 кВт/т; номинальное давление на грунт 60—90 кПа, не превышает несущую способность лесного грунта средней прочности (100 кПа). Класс лёгких форвардеров включает

машины с грузоподъёмностью 10—12 т, массой 15—17 т; мощность двигателя 120—200 кВт, коэффициент энергонасыщенности 4,5—6,5 кВт/т; номинальное давление на грунт 60—90 кПа. Класс средних форвардеров: грузоподъёмность 12—15 т, масса 16—20 т; мощность двигателя 120—200 кВт, коэффициент энергонасыщенности 4,5—7,5 кВт/т; номинальное давление на грунт 80—110 кПа, приближается к несущей способности лесного грунта средней прочности либо превышает её. Класс среднетяжёлых форвардеров: грузоподъёмность 15—18 т, масса 20—23 т; повышенная мощность двигателя в пределах 200—230 кВт, коэффициент энергонасыщенности 4,5—5,5 кВт/т; номинальное давление на грунт 80—110 кПа. Класс тяжёлых форвардеров: грузоподъёмность 18—20 т, масса 22—24 т; мощность двигателя 200—230 кВт, коэффициент энергонасыщенности 4,5—5,5 кВт/т; номинальное давление на грунт 80—110 кПа. К классу особо тяжёлых форвардеров отнесены машины, грузоподъёмность которых составляет 20—25 т, масса 26—27 т; мощность двигателя 230—250 кВт, коэффициент энергонасыщенности 4,5—5,5 кВт/т; номинальное давление на грунт 105—130 кПа, превышает несущую способность лесного грунта средней прочности.

Ключевые слова: колёсные лесные машины, грузоподъёмность, мощность двигателя, давление на грунт, метод *k*-средних

DOI: 10.15393/j2.art.2021.5983

Article

Forwarders classification basing on the characteristics data clustering

Aleksandr Andronov

Ph. D. in engineering, St. Petersburg State Forest Technical University named after S. M. Kirov (Russian Federation), andronovalexandr@gmail.com

Sergei Petrosian

Applicant, St. Petersburg State Forest Technical University named after S. M. Kirov (Russian Federation), tp_mlk@spbstu.ru

Aleksandr Egorin

Applicant, St. Petersburg State Forest Technical University named after S. M. Kirov (Russian Federation), lesbisnes@mail.ru

Dmitrii Iliushenko

Ph. D. in engineering, St. Petersburg State Forest Technical University named after S. M. Kirov (Russian Federation), dilium@yandex.ru

Egor Khitrov

D. Sc. in engineering, St. Petersburg State Forest Technical University named after S. M. Kirov (Russian Federation), yegorkhitrov@gmail.com

Received: 18 October 2021 / Accepted: 22 November 2021 / Published: 23 November 2021

Abstract: The paper studies data on payload, weight, engine power, power/weight ratio, nominal ground pressure of eight-wheeled forwarders produced by Gremo, HSM, Komatsu, Logset, Rottne, John Deere, Ponsse, Caterpillar, Tigercat, Timberpro manufacturers. For data analysis, the method of k-means data clustering was used. As a result, six classes of machines were identified. The class of extra light forwarders includes machines of 7-10 tons payload, 11-15 tons weight; 120-130 kW engine power, power/weight ratio of 5-6.5 kW/t; and the nominal ground pressure of 60-90 kPa, which does not exceed bearing capacity of forest soil of a medium strength (100 kPa). The class of light forwarders includes machines with a payload of 10-12 tons, weighing 15-17 tons; the engine power of within 120-200 kW, the power/weight ratio within 4.5-6.5 kW/t; and the nominal ground pressure of 60-90 kPa. Class of medium forwarders includes machines with payload of 12-15 tons, weighing 16-20 tons; engine power of 120-200

kW, power/weight ratio of 4.5-7.5 kW/t and the nominal ground pressure of 80-110 kPa, approaching or exceeding bearing capacity of medium-strength forest soil. Class of medium-heavy forwarders includes machines of payload of 15-18 t, weighting 20-23 t; the engine power of 200-230 kW, power/weight ratio of 4.5-5.5 kW/t; nominal ground pressure of 80-110 kPa. The class of heavy forwarders includes machines with a payload of 18-20 t, weighing 22-24 t; the engine power of 200-230 kW, power/weight ratio of 4.5-5.5 kW/t and nominal ground pressure of 80-110 kPa. The class of extra heavy forwarders includes machines with a payload of 20-25 tons, weighting up to 26-27 tons; the engine power within 230-250 kW, power/weight ratio of 4.5-5.5 kW / t and the nominal ground pressure of 105-130 kPa, which exceeds the bearing capacity of the medium-strength forest soil.

Keywords: wheeled forestry machines, payload, engine power, nominal ground pressure, k-means method

1. Введение

Для современных лесных машин характерна вариативность эксплуатационных характеристик. В частности, модели форвардеров отличаются друг от друга массой M , грузоподъёмностью L , мощностью двигателя N , грузоподъёмным моментом манипулятора LM и другими показателями. Обоснованные рекомендации по подбору техники, характеристики которой наилучшим образом сочетаются с природно-производственными условиями, востребованы в практике лесозаготовительного производства. Ввиду многообразия машин и изменчивости условий их эксплуатации, такие рекомендации удобнее формулировать не для отдельных моделей, а для классов машин, сгруппированных по каким-либо признакам (например, по грузоподъёмности или массе). Известно несколько вариантов классификации форвардеров, один из которых представлен в таблице 1.

Таблица 1. Классификация форвардеров [1]

Table 1. Forwarders classification [1]

Класс	M , т	N , кВт	L , т	LM , кНм
Лёгкий (для прореживания)	до 12	до 110	до 12	до 80
Средний (для выборочной и сплошной рубки)	12—16	110—150	12—15	80—150
Тяжёлый (для сплошной рубки)	> 16	> 150	> 15	> 150

В основу классификаций положена идея о делении диапазона изменения грузоподъёмности форвардеров (8—20 т) на три условных, приблизительно равных по длине, интервала. Модели машин относят к определённому классу при попадании значения грузоподъёмности в тот или иной интервал. Деление форвардеров на три класса (лёгкий, средний и тяжёлый) встречается и в каталогах некоторых производителей машин.

Аналогичный подход использован зарубежными учёными [2], однако предлагаемая классификация более подробна (таблица 2).

Таблица 2. Классификация форвардеров [2]

Table 2. Forwarders classification [2]

Класс	Микро	XXS	XS	S	M	L	XL	XXL
L , т	< 2	2—5	5—8	8—11	11—14	14—17	17—20	> 20

Также известна классификация лесных машин Г. М. Анисимова [3], в которой квалификационным признаком является отношение мощности двигателя к массе машины (коэффициент энергонасыщенности $K_Э$); предложено выделять четыре класса энергонасыщенности, рекомендуемых для определенных природно-производственных условий. Классификация приведена в таблице 3.

Таблица 3. Классификация лесных машин [3]

Table 3. Forestry vehicles classification [3]

Класс энергонасыщенности	Уровень энергонасыщенности	$K_э$, кВт/т
I	Особо большой	> 10
II	Большой	8,1—10
III	Средний	6,1—8
IV	Малый	< 6

Вводя классификацию по энергонасыщенности, авторы [3] также разделяют диапазон варьирования квалификационного признака на приблизительно равные интервалы.

Деление машин на классы по интервалам изменения их характеристик обосновано анализом опыта отрасли и традициями научных школ. Однако сравнивая границы изменения признаков для классов, отметим и субъективные предпочтения авторов. Возникает вопрос о целесообразности деления машин на классы по заранее намеченным интервалам изменения их характеристик.

Ранее выявлены корреляции грузоподъёмности машин, их массы, мощности двигателя и других показателей [4], [5], [6], [7]. В исследованиях [6], [7] проанализированы распределения трелёвочных тракторов по классам грузоподъёмности и энергонасыщенности, отмечены появление новых моделей техники с повышенной грузоподъёмностью и увеличение доли тяжёлых и высокоэнергонасыщенных машин от общего числа современных моделей форвардеров. Это обстоятельство, на наш взгляд, также свидетельствует о целесообразности уточнения классификации лесных машин, чему и посвящено наше исследование.

2. Материалы и методы

Изучены сведения о грузоподъёмности L , массе M , мощности двигателя N форвардеров. Для анализа использованы данные об эксплуатационных характеристиках восьмиколёсных форвардеров, предлагаемых производителями техники Gremo, HSM, Komatsu, Logset, Rottne, John Deere, Ponsse, Caterpillar, Tigercat, Timberpro, собранные с их официальных сайтов [8—17]. Дополнительно рассчитано номинальное давление движителя на грунт NGP по формуле [7]

$$NGP = \frac{M + L}{4Bd}, \quad (1)$$

где B — ширина колеса, d — диаметр колеса (B и d приняты в соответствии с маркировкой шин форвардеров в стандартной комплектации, сведения представлены на сайтах [8—17]), и отношение мощности N к сумме M , L (коэффициент энергонасыщенности):

$$ES = \frac{N}{M + L}, \quad (2)$$

Всего собраны характеристики для 52 моделей форвардеров, они приведены в таблице 4.

Таблица 4. Исходные данные (характеристики моделей форвардеров, использованных для анализа)

Table 4. Initial data (characteristics of forwarder models used for analysis)

№ п/п	Производитель	Модель	L, т	M, т	N, кВт	ES, кВт/т	NGP, кПа
1	Gremo	750F	8,5	11,0	119	6,10	83
2	Gremo	1050F	10,5	12,5	129	5,61	82
3	HSM	208F 7t	7,0	12,9	125	6,28	71
4	HSM	208F 9t	9,0	13,8	125	5,48	69
5	Komatsu	825TX	9,0	14,6	127	5,39	84
6	Logset	4F GT	10,0	13,5	127	5,40	71
7	Rottne	F10D	10,0	14,0	125	5,21	63
8	Gremo	1250F	12,5	16,5	149	5,14	76
9	HSM	208F 10t	10,0	16,2	175	6,68	69
10	HSM	208F 11t	11,0	16,5	185	6,73	72
11	HSM	208F 12t	12,0	16,9	185	6,40	76
12	John Deere	910G	10,0	15,0	118	4,73	72
13	John Deere	1010G	11,0	16,1	118	4,36	72
14	John Deere	1110G	12,0	17,1	145	4,98	77
15	Komatsu	835TX	11,0	16,1	127	4,69	96
16	Komatsu	845-2021	12,0	17,0	140	4,84	90
17	Logset	5F GT	12,0	15,5	140	5,09	72
18	Logset	5FP GT	12,0	16,5	169	5,93	75
19	Ponsse	Gazelle	10,0	15,4	145	5,71	90
20	Ponsse	Wisent	12,0	17,3	150	5,12	92
21	Rottne	F11D	12,0	16,2	125	4,43	74
22	Caterpillar	574	14,5	17,2	129	7,48	85
23	Gremo	574F	14,0	20,0	185	5,44	106
24	HSM	208F 14t	14,0	19,2	185	5,57	87
25	John Deere	1210G	13,0	18,1	156	5,02	82
26	John Deere	1510G	15,0	18,2	164	4,94	87
27	Komatsu	855-2020	14,0	18,1	187	5,83	100
28	Logset	6F GT	14,0	17,0	169	5,45	81
29	Logset	8F GT	15,0	17,5	190	5,85	85
30	Ponsse	Elk	13,0	18,8	145	4,56	99
31	Ponsse	Buffalo	14,0	19,8	205	6,07	89
32	Rottne	F13D	14,0	19,9	164	4,84	89
33	Rottne	F15D	15,0	18,7	164	4,87	89

№ п/п	Производитель	Модель	L , т	M , т	N , кВт	ES , кВт/т	NGP , кПа
34	Tigercat	1055C	14,0	18,4	165	5,10	85
35	Caterpillar	584	18,0	20,2	204	5,34	86
36	Gremo	584F	16,0	21,0	210	5,68	97
37	Komatsu	875-2020	16,0	20,1	190	5,26	95
38	Logset	10F GT	18,0	22,0	214	5,35	90
39	Ponsse	Buffalo King	18,0	21,1	205	5,24	103
40	Caterpillar	584HD	18,0	23,1	204	4,96	92
41	Gremo	594F	20,0	23,5	235	5,40	98
42	John Deere	1910G	19,0	22,2	200	4,85	108
43	Komatsu	895-2020	20,0	23,6	210	4,82	87
44	Logset	12F GT	20,0	24,0	214	4,86	99
45	Ponsse	Elephant	18,0	22,8	205	5,02	92
46	Ponsse	Elephant King	20,0	23,7	205	4,69	98
47	Rottne	F18D	18,0	22,9	207	5,06	92
48	Rottne	F20D	20,0	23,0	207	4,81	97
49	Tigercat	1075C	20,0	23,5	230	5,28	98
50	Timberpro	830D	20,0	25,9	249	5,42	121
51	Tigercat	1085C	25,0	27,3	230	4,40	105
52	Timberpro	840D	22,0	27,3	249	5,05	129

Для анализа данных использован метод кластерного анализа (метод k -средних [18]). Алгоритм метода k -средних реализован в среде *MS-Excel*. Решалась задача оптимального разбиения моделей на группы (кластеры) по условию минимума ошибки разбиения:

$$\varepsilon = \sum_{q=1}^k \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \left(\frac{w_j |x_{j,i} - c_{j,q}|}{R_j} \right) \rightarrow \min, \quad (2)$$

где c — координата центра тяжести кластера, R — размах выборки, w — вес признака, k — число кластеров, m — число признаков, по которым проводится кластеризация, n — размер выборки, индекс i соответствует номеру модели машины, j — номеру признака, по которому проводится группировка, q — номеру кластера.

Число кластеров определили с помощью формулы Стирджесас округлением до ближайшего целого числа:

$$k = 1 + 3,2 \lg n, \quad (3)$$

В качестве признаков использовали L , M , NGP с равными весами. Важно отметить, что и признаки, и число кластеров в общем случае могут быть произвольными. Подбор проводится в несколько шагов с идеей получить возможно более «удачные» результаты разделения моделей по кластерам, диапазоны изменения характеристик в которых будут наиболее «обособленными».

Порядок реализации алгоритма:

1. Принимаем число кластеров данных k и произвольно задаём их центры тяжести.
2. Каждую модель относим к определённому кластеру с ближайшим центром, т. е. с минимальным расстоянием по формуле (2).
3. В результате разделения моделей по кластерам вычисляем их новые центры (координаты соответствуют средним арифметическим значениям признаков в q -м кластере).
4. Повторяем шаги 2, 3 до тех пор, пока центры кластеров не стабилизируются.

3. Результаты

На начальном этапе примем координаты центров тяжести кластеров в соответствии с таблицей 5.

Таблица 5. Начальные значения центров тяжести кластеров при разделении моделей форвардеров на 6 кластеров по грузоподъёмности и массе

Table 5. Initial cluster centers

Признак	Номер кластера					
	1	2	3	4	5	6
L , т	8,50	11,50	14,50	17,50	20,50	23,50
M , т	12,36	15,08	17,80	20,52	23,24	25,96
NGP , кПа	68,5	79,5	90,5	101,5	112,5	123,5

После четырёх итераций метода центры тяжести кластеров стабилизировались. Результаты кластеризации данных (с округлением) представлены в таблице 6.

Таблица 6. Центры тяжести кластеров при разделении моделей форвардеров на 6 кластеров по грузоподъёмности и массе

Table 6. Cluster centers (final iteration)

Кластер	n	L , т	M , т	N , кВт	ES , кВт/т	NGP , кПа
1	7	9,14	13,18	125,29	5,64	74,71
2	11	11,32	16,17	150,36	5,47	75,00
3	16	13,66	18,20	164,06	5,35	90,13
4	8	17,50	21,65	204,88	5,24	93,38
5	7	19,86	23,36	214,43	4,96	97,86
6	3	22,33	26,83	242,67	4,96	118,33

Сопоставим данные, приведённые в таблице 6. На рисунках 1—4 проиллюстрированы взаимосвязи центров тяжести кластеров по таблице 6.

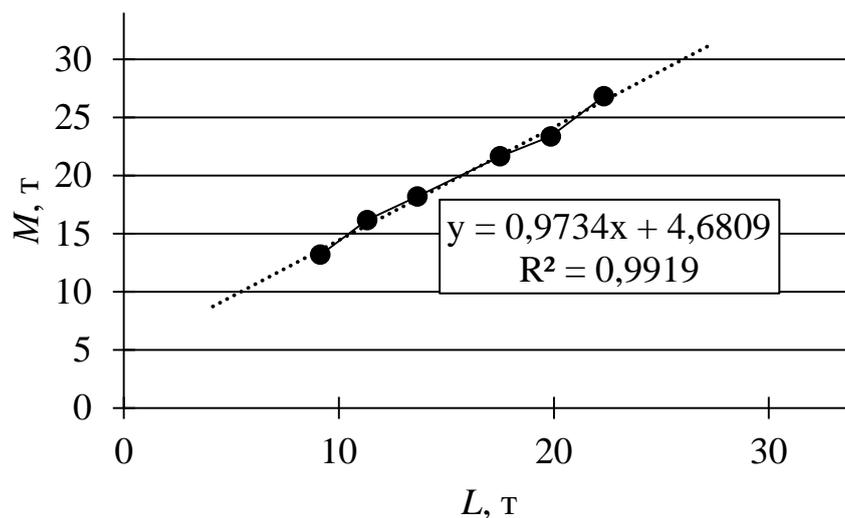


Рисунок 1. Связь среднего значения массы и грузоподъёмности форвардеров в кластерах

Figure 1. Travel load vs. weight of forwarders by cluster

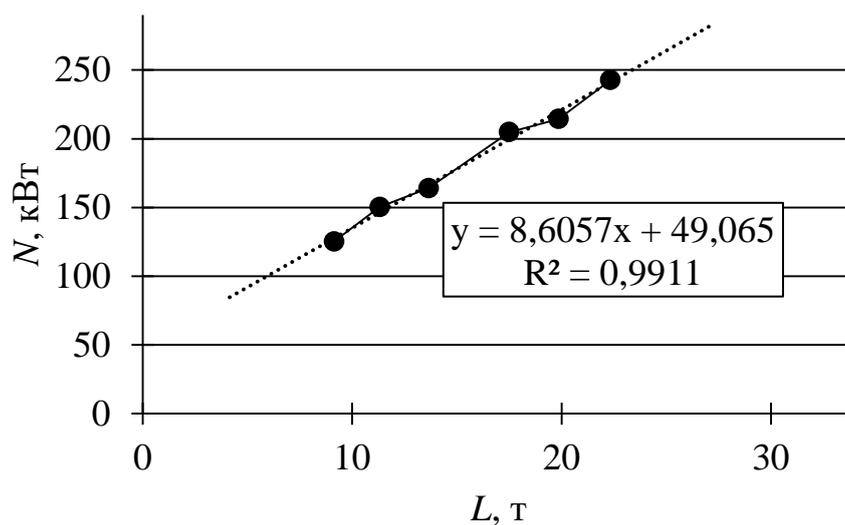


Рисунок 2. Связь среднего значения мощности двигателя и грузоподъёмности форвардеров в кластерах

Figure 2. Engine output vs. travel load of forwarders by cluster

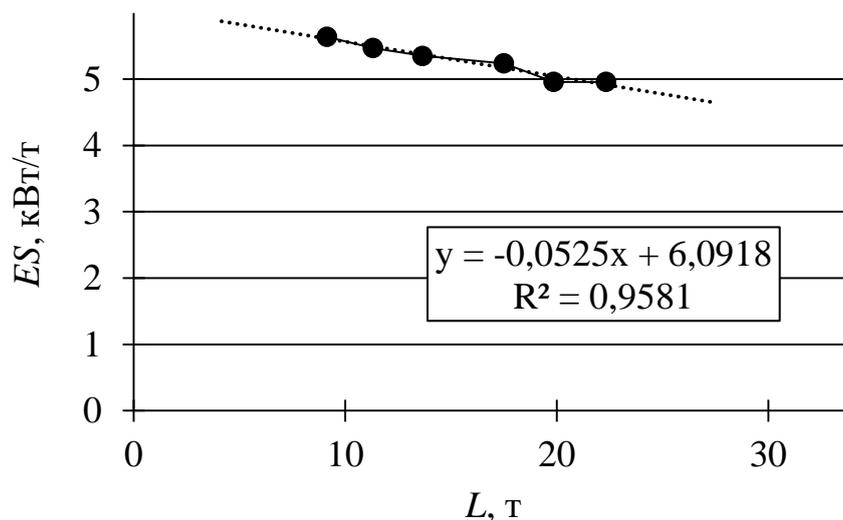


Рисунок 3. Связь среднего отношения мощности двигателя к сумме массы и грузоподъёмности и грузоподъёмности форвардеров в кластерах

Figure 3. Power/weight ratio vs. travel load of forwarders by cluster

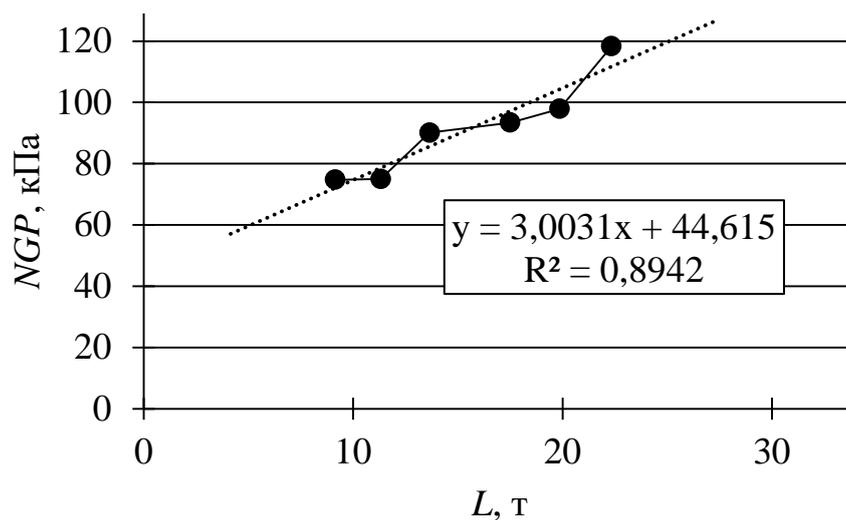


Рисунок 4. Связь номинального давления на грунт и грузоподъёмности форвардеров в кластерах

Figure 4. Nominal ground pressure vs. travel load of forwarders by cluster

Полученные линейные функции:

$$M = 0,9734L + 4,6809, \tag{4}$$

$$N = 8,6057L + 49,065, \quad (5)$$

$$ES = -0,0525L + 6,0918, \quad (6)$$

$$NGP = 3,0031L + 44,615 \quad (7)$$

могут использоваться при разработке программ для автоматизированной оценки показателей трелёвки форвардерами. Размерности величин в формулах совпадают с указанными на рисунках 1—4.

В таблице 7 приведены диапазоны варьирования эксплуатационных характеристик форвардеров из таблицы 4, распределённых по кластерам.

Таблица 7. Диапазоны варьирования эксплуатационных характеристик форвардеров по кластерам

Table 7. Variation of performance characteristics of forwarders by cluster

Кластер	L , т	M , т	N , кВт	ES , кВт/т	NGP , кПа
1	7—10,5	11—14,58	119—129	5,21—6,28	63—84
2	10—12,5	14,95—17,13	118—185	4,36—6,73	69—90
3	11—15	16,09—20	127—205	4,56—7,48	81—106
4	16—18	20,1—23,088	190—214	4,96—5,68	86—103
5	19—20	22,2—24	200—235	4,69—5,4	87—108
6	20—25	25,9—27,325	230—249	4,4—5,42	105—129

Заметим, что при кластеризации использован не один квалификационный признак, а несколько, в связи с чем диапазоны изменения эксплуатационных характеристик машин, отнесённых к определённым кластерам, пересекаются. Воспользуемся полученными результатами и с округлением предложим расширенную классификацию восьмиколёсных форвардеров, в которой ведущим признаком является грузоподъёмность (таблица 8).

Таблица 8. Предлагаемая расширенная классификация восьмиколёсных форвардеров

Table 8. Suggested forwarder classification

Класс	L , т	M , т	N , кВт	ES , кВт/т	NGP , кПа
I, XS	7—10	11—15	120—130	5—6,5	60—90
II, S	10—12	15—17	120—200	4,5—6,5	
III, M	12—15	16—20		200—230	4,5—7,5
IV, ML	15—18	20—23			
V, L	18—20	22—24			
VI, XL	20—25	26—27	230—250	4,5—5,5	105—130

4. Обсуждение и заключение

В предложенной классификации (таблица 8) характерны следующие диапазоны эксплуатационных изменений характеристик машин:

- Класс I, XS. Особо лёгкие форвардеры. Грузоподъёмность 7—10 т, масса 11—15 т. Мощность двигателя 120—130 кВт, повышенный коэффициент энергонасыщенности в пределах 5—6,5 кВт/т. Номинальное давление на грунт 60—90 кПа, не превышает несущую способность лесного грунта средней прочности (100 кПа); без ограничений проходимости на грунтах средней прочности [19].
- Класс II, S. Лёгкие форвардеры. Грузоподъёмность 10—12 т, масса 15—17 т. Мощность двигателя 120—200 кВт, коэффициент энергонасыщенности 4,5—6,5 кВт/т. Номинальное давление на грунт 60—90 кПа, не превышает несущую способность лесного грунта средней прочности; без ограничений проходимости на грунтах средней прочности [19].
- Класс III, M. Средние форвардеры. Грузоподъёмность 12—15 т, масса 16—20 т. Мощность двигателя 120—200 кВт, коэффициент энергонасыщенности 4,5—7,5 кВт/т. Номинальное давление на грунт 80—110 кПа, приближается к несущей способности лесного грунта средней прочности либо превышает её; возможны ограничения проходимости на грунтах средней прочности [19].
- Класс IV, ML. Среднетяжёлые форвардеры. Грузоподъёмность 15—18 т, масса 20—23 т. Повышенная мощность двигателя в пределах 200—230 кВт, коэффициент энергонасыщенности 4,5—5,5 кВт/т. Номинальное давление на грунт 80—110 кПа, приближается к несущей способности лесного грунта средней прочности либо превышает её; возможны ограничения проходимости на грунтах средней прочности [19].
- Класс V, L. Тяжёлые форвардеры. Грузоподъёмность 18—20 т, масса 22—24 т. Мощность двигателя 200—230 кВт, коэффициент энергонасыщенности 4,5—5,5 кВт/т. Номинальное давление на грунт 80—110 кПа, приближается к несущей способности лесного грунта средней прочности либо превышает её; возможны ограничения проходимости на грунтах средней прочности [19].
- Класс VI, XL. Особо тяжёлые форвардеры. Грузоподъёмность 20—25 т, масса 26—27 т. Мощность двигателя 230—250 кВт, коэффициент энергонасыщенности 4,5—5,5 кВт/т. Номинальное давление на грунт 105—130 кПа, превышает несущую способность лесного грунта средней прочности; проходимость на лесных грунтах средней прочности не обеспечивается [19].

На наш взгляд, выделение дополнительных классов форвардеров позволяет точнее формулировать рекомендации по подбору техники с учётом не только грузоподъёмности, но и проходимости, а также энергонасыщенности.

Использование алгоритма кластеризации для выявления групп машин со схожими характеристиками по нескольким или приведённым признакам в дальнейших исследованиях

позволит развить классификацию лесных машин, сделав её более удобной в плане подбора техники по критериям экологичности, энергоёмкости и др.

5. Авторский вклад

Андронов А. В. (30 %): идея исследования, анализ состояния вопроса, интерпретация результатов обработки данных, формулирование выводов и подготовка текста; Ильюшенко Д. А. (10 %): интерпретация результатов обработки данных, формулирование выводов и подготовка текста; Петросян С. С. (25 %): сбор и первичная обработка данных; Егорин А. А. (25 %): сбор и первичная обработка данных; Хитров Е. Г. (10 %): реализация алгоритма кластеризации, координация и общее редактирование работы.

Список литературы

1. Форвардеры на лесозаготовках. Ч. 1: Классификация и особенности конструкции / Л. Д. Бухтояров, В. В. Абрамов, А. А. Просужих, С. Е. Рудов, И. В. Григорьев, О. А. Куницкая // Леспроектинформ. 2020. № 4 (150). С. 64—69.
2. Газеева Е. А., Уразова А. Ф. Классификация харвестеров и форвардеров // Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века: Труды IX междунар. евразийского симпозиума / Под науч. ред. В. Г. Новоселова. 2014. С. 60—65.
3. The technical development of forwarders in Sweden between 1962 and 2012 and of sales between 1975 and 2017 / Т. Nordfjell, E. Öhman, O. Lindroos, B. Ager // International Journal of Forest Engineering, 2019. No 30:1. P. 1—13. DOI: 10.1080/14942119.2019.1591074.
4. Анисимов Г. М., Большаков Б. М. Новые концепции теории лесосечных машин. СПб.: ЛТА, 1998. 114 с.
5. Morphological Analysis of Forest Tractor Assemblies / M. Šušnjar, D. Horvat, K. Andrija, Z. Pandur // Croatian Journal of Forest Engineering. 2008. No 29.
6. Horvat D., Zečić Ž., Šušnjar M. Morphological characteristics and productivity of skidder ECOTRAC 120V // Croatian Journal of Forest Engineering : Journal for Theory and Application of Forestry Engineering. 2007. No 28 (1). P. 11—25.
7. Хахина А. М. Методы прогнозирования и повышения проходимости колёсных лесных машин: Дис. ... д-ра техн. наук: 05.21.01. СПб., 2018. 318 с.
8. Официальный сайт компании Caterpillar. URL: <https://www.peteroncat.com/products/new/product-line/forwarders/forwarder/> (дата обращения: 04.10.2021).
9. Официальный сайт компании Ecolog. URL: <https://ecologforestry.com/en/products/forwarders/> (дата обращения: 04.10.2021).
10. Официальный сайт компании HSM. URL: <https://www.hsm-forest.net/forwarders.html> (дата обращения: 04.10.2021).
11. Официальный сайт компании Logset. URL: <https://www.logset.com/en/forwarders> (дата обращения: 04.10.2021).
12. Официальный сайт компании Rottne. URL: <https://www.rottnet.com/en/skogsmaskiner/skotare/> (дата обращения: 04.10.2021).
13. Официальный сайт компании Timberpro. URL: <https://timberpro.com/Brochures/brochure-800D.html> (дата обращения: 04.10.2021).
14. Официальный сайт компании Tigercat. URL: <https://www.tigercat.com/products/forwarders/> (дата обращения: 04.10.2021).

15. Официальный сайт компании Komatsu. URL: <https://www.komatsuforest.com/forest-machines/our-forwarders> (дата обращения: 04.10.2021).
16. Официальный сайт компании John Deere. URL: <https://www.deere.com/en/forwarders/> (дата обращения: 04.10.2021).
17. Официальный сайт компании Ponsse. URL: <https://www.ponsse.com/en/products/forwarders#/> (дата обращения: 04.10.2021).
18. Aggarwal Ch., Reddy Ch. Data clustering. Algorithms and Applications. Chapman and Hall, 2013. 652 p.
19. Хитров Е. Г. Комплексное обоснование параметров и режимов работы движителей лесных машин: Дис. ... д-ра техн. наук: 05.21.01. Воронеж, 2020. 319 с.

References

1. Bukhtoyarov L. D., Abramov V. V., Prosuzhikh A. A., Rudov S. E., Grigoriev I. V., Kunitskaya O. A. Forwarders in logging. Part 1: Classification and design features. *Lesprominform*. 2020, no 4 (150), pp. 64—69. (In Russ.)
2. Gazeeva E. A., Urazova A. F. Classification of harvesters and forwarders. *Woodworking: technologies, equipment, management of the XXI century. Proceedings of the IX International Eurasian Symposium. Under the scientific editorship of V. G. Novoselova*, 2014, pp. 60—65. (In Russ.)
3. Nordfjell T., Öhman E., Lindroos O., Ager B. The technical development of forwarders in Sweden between 1962 and 2012 and of sales between 1975 and 2017. *International Journal of Forest Engineering*, 2019, no 30:1, pp. 1—13. doi: 10.1080 / 14942119.2019.1591074.
4. Anisimov G. M., Bol'shakov B. M. *New concepts of the theory of cutting machines*. St. Petersburg, LTA, 1998. 114 p. (In Russ.)
5. Sušnjar M., Horvat D., Andrija K., Pandur Z. Morphological Analysis of Forest Tractor Assemblies. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2008, no 29.
6. Horvat D., Zečić Ž., Šušnjar M. Morphological characteristics and productivity of skidder ECOTRAC 120V. *Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering*, 2007, no 28 (1), pp. 11—25.
7. Khakhina A. M. *Methods for forecasting and increasing the cross-country ability of wheeled forest machines*: Dis. ... Dr. Tech. Sciences: 05.21.01. St. Petersburg, 2018. 318 p. (In Russ.)
8. Official web-site of Caterpillar company. Available at: <https://www.petersoncat.com/products/new/product-line/forwarders/forwarder/> (accessed: 04.10.2021).
9. Official web-site of Ecolog company. Available at: <https://ecologforestry.com/en/products/forwarders/> (accessed: 04.10.2021).
10. Official web-site of HSM company. Available at: <https://www.hsm-forest.net/forwarders.html> (accessed: 04.10.2021).
11. Official web-site of Logset company. Available at: <https://www.logset.com/en/forwarders> (accessed: 04.10.2021).
12. Official web-site of Rottne company. Available at: <https://www.rottnet.com/en/skogsmaskiner/skotare/> (accessed: 04.10.2021).
13. Official web-site of Timberpro company. Available at: <https://timberpro.com/Brochures/brochure-800D.html> (accessed: 04.10.2021).
14. Official web-site of Tigercat company. Available at: <https://www.tigercat.com/products/forwarders/> (accessed: 04.10.2021).
15. Official web-site of Komatsu company. Available at: <https://www.komatsuforest.com/forest-machines/our-forwarders> (accessed: 04.10.2021).

16. Official web-site of John Deere company. Available at: <https://www.deere.com/en/forwarders/> (accessed: 04.10.2021).
17. Official web-site of Ponsse company. Available at: <https://www.ponsse.com/en/products-/forwarders#/> (accessed: 04.10.2021).
18. Aggarwal Ch., Reddy Ch. *Data clustering. Algorithms and Applications*. Chapman and Hall, 2013. 652 p.
19. Khitrov E. G. *Comprehensive substantiation of parameters and operating modes of forest machines propellers*: Dis. ... Dr. Tech. Sciences: 05.21.01. Voronezh, 2020. 319 p. (In Russ.)

© Андронов А. В., Петросян С. С., Егорин А. А., Ильюшенко Д. А., Хитров Е. Г., 2021