

ШЛЯХИ ЗБІЛЬШЕННЯ ПАСАЖИРОВМІСТИМОСТІ ПЕРСПЕКТИВНИХ МІСЬКИХ ЕЛЕКТРОБУСІВ ТИПУ ОНС

ТзОВ "Науково-технічний центр "Автополіпром"

Анотація

Розглянуті та проаналізовані напрямки збільшення номінальної пасажировмістимості перспективних міських низькопідлогових електробусів з тяговими акумуляторними батареями. Запропонований варіант створення міських електробусів, основний блок тягових акумуляторних батарей яких розміщений у одностововому причепі, жорстко з'єднаним з кузовом електробуса-тягача з мінімальним заднім звисом. Наведена оцінка перспективності їх створення, виробництва та експлуатації в умовах економічного розвитку України.

Ключові слова: міський електробус, тягова акумуляторна батарея, паливний елемент, дизель-генераторна установка, одно мостовий причеп, колісна формула, електричний двигун.

Abstract

The directions of increase of nominal passenger capacity of perspective city low-floor electric buses with traction accumulators are considered and analyzed. A variant of creating capacious electric buses is proposed, the main unit of traction batteries of which is placed in a rigidly connected single-axle trailer with the body of an electric bus-tractor with minimal rear overhang. The estimation of prospects of their creation, production and operation in the conditions of economic development of Ukraine is given.

Keywords: city electric bus, traction battery, fuel cell, diesel generator set, single axle trailer, wheel formula, electric motor.

Вступ

Міські низькопідлогові електробуси все ширше застосовуються у системах міських перевезень пасажирів у багатьох європейських та інших країнах світу, зокрема, в Європі, США та Китаї. Проте, у нашій державі використання міських електробусів для перевезень пасажирів майже відсутнє. Адже, наразі, лише дві моделі міських електробусів вітчизняного виробництва та кілька моделей електробусів китайських виробників у деяких містах проходять підконтрольну експлуатацію.

Метою роботи являється розроблення та аналіз можливих варіантів збільшення номінальної пасажировмістимості міських низькопідлогових електробусів типу ОНС, обладнаних тяговими акумуляторними батареями (АКБ), та оцінка перспективності їх створення і експлуатації.

Результати дослідження

Одним з найбільш вагомих параметрів, від яких залежить ефективність експлуатації електробусів при перевезеннях пасажирів на міських маршрутах, являється номінальна пасажировмістимість. В загальному випадку вона залежить від допустимої повної маси електробуса, від його маси у спорядженому стані та від маси тягових АКБ, яка тісно пов'язана з величиною заданого добового пробігу

$$N_{ном} \leq \frac{[M_n] - \left(M_{cn}^0 + \frac{\Delta w_{ml} \times [M_n]}{k_p \times \rho_{акб}^w} \times L_{np} \right) - m_{вод}}{m_{нас}}, \quad (1)$$

де $[M_n]$ – допустима повна маса електробуса, кг; M_{cn}^0 – маса електробуса у спорядженому стані без урахування маси тягових АКБ, кг; Δw_{ml} – питома витрата електроенергії тягових АКБ при перевезенні пасажирів за масою електробуса та пробігом, кВт·год./кг·км; L_{np} – задана величина денного автономного пробігу, км; k_p – коефіцієнт допустимого розрядження тягових АКБ; $\rho_{акб}^w$ – питома енергопотужність тягових АКБ, кВт·год./кг; $m_{вод}$ – маса водія, кг; $m_{нас}$ – маса пасажирів, кг.

Споряджена маса електробуса без урахування маси тягових АКБ визначається за наступним виразом

$$M_{cn}^0 = \Delta m_{к0}^l \times L_k + \sum_{i=1}^n M_{(tp_i+x_{q_i})} + m_{ck} + m_{cз} + \sum_{i=1}^n M_{ин_i}, \quad (2)$$

де $\Delta m_{к0}^l$ – питома маса 1-го погонного метра кузова електробуса без мас керованого і тягового мостів з колесами та тягових АКБ, кг/м; L_k – довжина кузова електробуса, м; $\sum_{i=1}^n M_{(tp_i+x_{q_i})}$ – маса агрегатів трансмісії та ходової частини електробусів, кг; m_{ck} – маса системи керування тяговим приводом, кг; $m_{cз}$ – маса системи заряджання тягових АКБ, кг; $\sum_{i=1}^n M_{ин_i}$ – маса інших комплектувальних виробів – системи автономного опалення, системи кондиціонування повітря у пасажирському салоні, системи пневматичного гальмівного приводу тощо, кг.

Отже, з аналізу виразів (1) та (2) можна запропонувати наступні шляхи збільшення номінальної пасажировмістимості міських електробусів типу ONC:

- варіант № 1 – зменшення спорядженої маси електробусів за рахунок оптимізації довжини їх кузовів та застосування тягових мостів з незалежною підвіскою одинарних коліс [1];
- варіант № 2 – застосування причепів для розміщення основних блоків тягових АКБ;
- варіант № 3 – застосування системи заміни розряджених тягових АКБ, розміщених у кузовах електробусів [2];
- варіант № 4 – застосування колісної формули 6x2.1 замість формули 4x2.2.

Для проведення розрахункових досліджень розроблені чотири ескізні проекти базових моделей електробусів типу ONC на основі застосування однакових комплектувальних виробів їх трансмісій та ходових частин, зокрема, мостів виробництва італійської компанії "Bgrist Axle S.r.l." моделей [3]:

- IFS TJC 80-225 – керований міст з пневматичною підвіскою коліс;
- IDS TJ 105-225 HR – тяговий міст з пневматичною підвіскою коліс і редуктором головної передачі (ГП);
- IS TJ 81-225 – тримальний міст з пневматичною підвіскою коліс.

Маса агрегатів трансмісії та ходової частини електробусів з вибраними мостами визначається за формулою

$$\sum_{i=1}^n M_{(tp_i+x_{q_i})} = \sum_{i=1}^n M_{tp_i} + \sum_{i=1}^n M_{x_{q_i}} = m_{едп} + m_{км} + m_{тм} + m_{пм} + n_{кол} (m_{кд} + m_{ш}), \quad (3)$$

де $m_{едп}$ – маса тягового електродвигуна (ТЕД) і карданної передачі, кг; $m_{км}$ – маса керованого моста з підвіскою, кг; $m_{тм}$ – маса тягового моста з підвіскою, кг; $m_{пм}$ – маса підтримуючого моста з підвіскою, кг; $n_{кол}$ – кількість коліс на обох (трьох) мостах, од; $m_{кд}$ – маса 1-го колісного диска відповідного типорозміру, кг; $m_{ш}$ – маса 1-ї пневматичної шини відповідного типорозміру, кг.

Основні технічні параметри керованого, тягового та тримального мостів з підвісками та одинарними колесами наведені у табл. 1.

Таблиця 1 – Параметри мас керованого, тягового та тримального мостів міських електробусів

Модель тягового моста	IFS TJC 58-225	IDS TJ 105-225 HR	IS TJ 81-225
Допустима навантага, кН (кГс)	78,4 (8000)	103,0 (10500)	79,4 (8100)
Маса моста з підвіскою без коліс, кг	469	650	574
Типорозмір колісних дисків	9.00x22,5"	11.25x22,5"	9.00x22,5"
Типорозмір шин	315/70 R22,5	385/55 R22,5	315/70 R22,5
Маса диска/ шини, кг	43,5/ 64,5	45,5/ 75	43,5/ 64,5
Маса коліс моста, кг	216	241	216
Маса моста з підвіскою і колесами, кг	685	891	790

Маса ТЕД моделі "TM4 SUMO MD HV2200-3P" виробництва канадської фірми "Dana TM4 Inc." номінальною потужністю 215 кВт становить 225 кг, а карданної передачі – 35 кг.

За розробленими ескізними проектами міських електробусів у різних варіантах (рис. 1) визначені площі, передбачені для розміщення стоячих пасажирів.

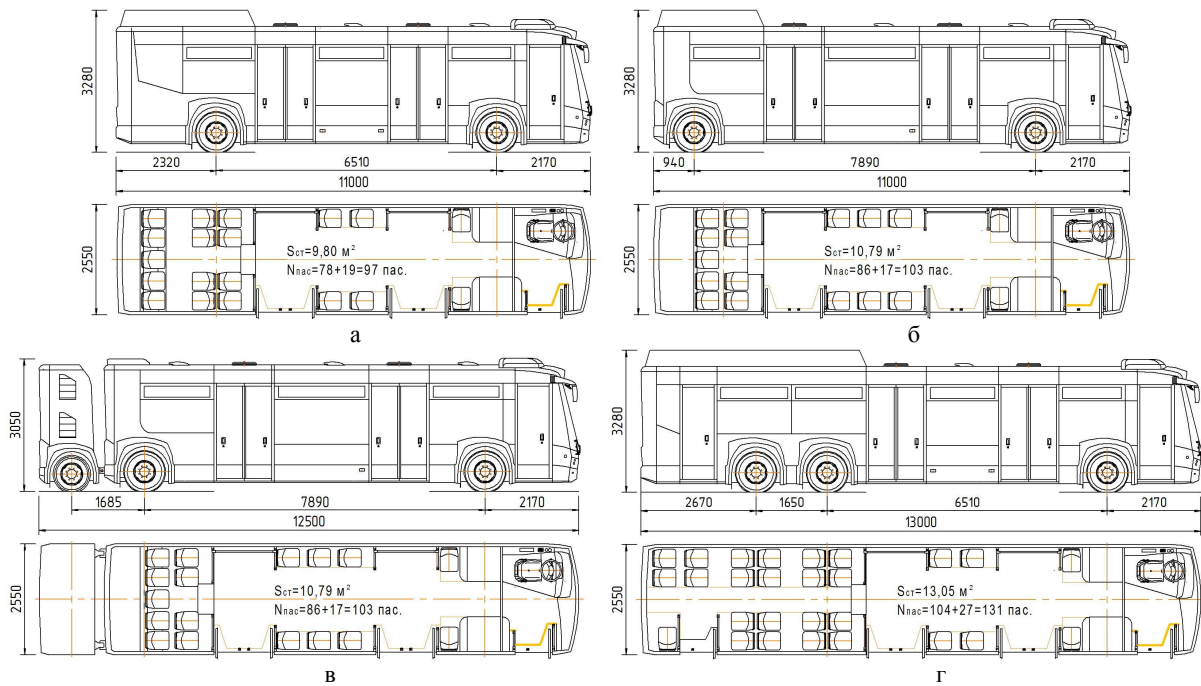


Рис. 1. Ескізні проекти перспективних міських електробусів типу ONC у різних варіантах:
а) – sV-01 (ONC-C); б) – sV-02 (ONC-V); в) – sV-03 (ONC-T); г) – sV-04 (ONC-C)

Для визначення пасажиромістимості міських електробусів за площею пасажирського салону застосований вираз

$$N_{nac}^s = \frac{S_{cm}}{m_{nac}}, \quad (4)$$

де S_{cm} – площа пасажирського салону, передбачена для розміщення стоячих пасажирів, м²; m_{nac} – маса пасажирів, кг.

Відповідно до вимог Правил ЄЕК ООН № 107 [4] $m_{вод} = 75$ кг; $m_{nac} = 68$ кг.

Номінальна пасажиромістимість міських електробусів за допустимою повною масою визначається за формулою

$$N_{ном} = \frac{[M_n] - (M_{cn} + m_{вод})}{m_{nac}}, \quad (5)$$

де $[M_n]$ – допустима повна маса електробуса, кг; M_{cn} – маса електробуса у спорядженому стані, кг.

Допустима повна маса електробусів прийнята рівною $[M_n] = 18000$ кг, аналогічно допустимій повній масі двомостових автобусів, тролейбусів та вантажних автомобілів.

Маса електробусів у спорядженому стані з урахуванням маси тягових АКБ становить

$$M_{cn} = M_{cn}^0 + m_{акб}, \quad (6)$$

де $m_{акб}$ – маса тягових АКБ, кг;

$$m_{акб} = \frac{\Delta w_m \times [M_n]}{k_p \times \rho_{акб}^w} L_{np}, \quad (7)$$

Для сучасних літєвих тягових АКБ типу LiFePO₄ $\rho_{акб}^w = 0,09-0,10$ кВт·год./кг, а коефіцієнт робочого діапазону $k_p = 0,85-0,9$.

Для проведення розрахункових досліджень прийнято $k_p = 0,85$; $\Delta w_m = 0,075 \cdot 10^{-3}$ кВт·год./кг·км та $\rho_{акб}^w = 0,10$ кВт·год./кг. Результати визначення мас міських електробусів у спорядженому стані без мас тягових АКБ за виразом (2) за прийнятими величинами $\Delta m_{к0}^l = 680$ кг/м; $m_{ск} = 300$ кг; $m_{сз} = 100$ кг; $\sum_{i=1}^n M_{ін_i} = 1000$ кг, наведені у табл. 2.

Таблиця 2 – Параметри мас міських електробусів типу ONC

Проект електробуса	sV-01 (ONC-C)	sV-02 (ONC-V)	sV-03 (ONC-T)	sV-04 (ONC-C)
Довжина кузова, L_K , м	11,0		13,0	
Маса спорядженого кузова без мас мостів, підвісок, коліс, тягових АКБ та інших складових частин, $M_{к0}^l$, кг	7480		8840	
Маса керованого моста з підвіскою і колесами, кг	685			
Маса тягового моста з підвіскою і колесами, кг	891			
Маса підтримуючого моста з підвіскою і колесами, кг	-		790	
Маса електродвигуна і карданної передачі, $m_{едк}$, кг	260			
Маса системи керування тяговим приводом, $m_{ск}$, кг	300			
Маса системи заряджання тягових АКБ, $m_{сз}$, кг	100			
Маса інших складових частин, $\sum_{i=1}^n M_{ін_i}$, кг	1000			
Маса спорядженого електробуса без урахування маси тягових АКБ, кг	10716		10716 + 500	12866

Для визначення маси тягових АКБ приймаємо величину денного автономного пробігу електробуса рівною $L_{np} = 200$ км для електробусів підтипів ONC-C та ONC-T, а для електробуса підтипу ONC-V – 100 км.

Маса необхідної енергопотужності тягових АКБ для подолання заданого автономного пробігу електробусами різних варіантів наведена у табл. 3.

Таблиця 3 – Маса тягових АКБ, необхідних для забезпечення заданих автономних пробігів міськими електробусами типу ONC

Проект електробуса	sV-01 (ONC-C)	sV-02 (ONC-V)	sV-03 (ONC-T)	sV-04 (ONC-C)
Заданий автономний пробіг, L_{np} , км	200	100	200	
Маса тягових АКБ, кг	3200	1600	3200	4600

Параметри номінальної пасажировмістимості міських електробусів, створених за різними варіантами, наведені у табл. 4.

Таблиця 4 – Параметри номінальної пасажировмістимості міських електробусів типу ONC

Проект електробуса	sV-01 (ONC-C)	sV-02 (ONC-V)	sV-03 (ONC-T)	sV-04 (ONC-C)
Допустима повна маса електробусів, кг	18000		26000	
Повна маса електробуса з причепом, кг	18000		22500	
Маса спорядженого електробуса без урахування маси тягових АКБ, кг	10670		10670 + 630	
Маса тягових АКБ, кг	3200	1600	400+3600	4600
Маса електробуса у спорядженому стані, кг	13870	12270	11300 + 4230	17566
Маса пасажирів, кг	4055	5655	7295	8534
Номінальна пасажировмістимість за допустимою масою пасажирів, чол.	60	83	101	124
Номінальна пасажировмістимість за площею пасажирського салону, чол.	97	103		131
Номінальна пасажировмістимість електробусів, чол.	60	83	101	124

Аналіз технічних параметрів міських електробусів проектів sV-01, sV-02, sV-03 та sV-04 показує, що за номінальною пасажировмістимістю більш доцільними являються електробуси підтипів ONC-T

(проект sV-03) та ONC-C (проект sV-04) з колісною формулою 6x2.1, номінальна пасажиромісткість якого більш ніж вдвічі вища за електробус аналогічного підтипу з колісною формулою 4x2.1 (проект sV-01).

Крім того, на відміну від електробуса моделі ПК ТС-6218 "Пионер" [5] з двомостовим причепом, який необхідно один раз під час перебування на маршруті міняти, електробус проекту sV-03 (ONC-T) не потребує заміни тягових АКБ, розміщених на одномостовому причепі, оскільки їх енергопотужність забезпечує задану величину добового автономного пробігу у 200 км.

Для визначення перспективного напрямку створення міських електробусів типу ONC з наведених вище варіантів пропонується коефіцієнт експлуатаційної ефективності міських електробусів, який визначається за формулою

$$E_{ев} = 0,5 + k_e \times \frac{10^2 N_{пас} \times L_{пр}}{m_{акб} \times \rho_{акб} \times M_n^e}, \quad (8)$$

де k_e – коефіцієнт, розмірність якого – кВт·год./чол.·км; M_n^e – розрахункова повна маса електробуса, кг.

Розрахункові величини коефіцієнтів експлуатаційної ефективності міських електробусів наведені у табл. 5.

Таблиця 5 – Коефіцієнти експлуатаційної ефективності міських електробусів типу ONC

Проект електробуса	sV-01 (ONC-C)	sV-02 (ONC-V)	sV-03 (ONC-T)	sV-04 (ONC-C)
Коефіцієнт експлуатаційної ефективності, $E_{ев}$	0,708	0,788	0,724	0,707

Отже, навіть з огляду на меншу на 18 чол. і на 41 чол. номінальну пасажиромісткість експлуатація електробусів проекту sV-03 підтипу ONC-V являється найвигіднішим варіантом для фірм-перевізників. Проте, цей підтип електробусів потребує будівництва спеціальних роботизованих станцій заміни відпрацьованих блоків тягових АКБ та відповідних чималих капіталовкладень, а також професійного персоналу, послуги якого вимагають додаткових витрат. До переваг електробусів цього підтипу можна віднести коротший кузов по відношенню до загальної довжини електробусів підтипів ONC-T на 1,5 м та ONC-C з колісною формулою 6x2.1 на 2,0 м.

Міські електробуси підтипу ONC-C з колісними формулами 4x2.2 та 4x2.1 являються не оптимальними для міських перевезень пасажирів, особливо за умови обмеження допустимої повної маси на рівні $[M_n] = 18000$ кг. Навіть при збільшенні допустимої повної маси до 19500 кг номінальна пасажиромісткість таких електробусів становитиме лише 78 чол. Проте, застосування у їх конструкціях тягових мостів з допустимою навантагою 13,24 кН (13500 кгс) сприяє процесу пришвидшеного руйнування покриття міських вулиць.

Електробус проекту sV-03 (ONC-T) з мінімізованим заднім звисом обладнаний причепом, з'єднаним з кузовом електробуса подвійним зчпним пристроєм, який забезпечує їх відносне переміщення лише у поздовжній вертикальній площині.

Оскільки причіп з тяговими АКБ у електробусів проекту sV-03 практично завжди заблокований з кузовом електробуса, у причепі доцільно розмістити усі тягові АКБ. Завдяки такому рішенню можливе збільшення пасажиромісткості електробуса ще на 4 чол., тобто до 107 чол., при збільшенні довжини його кузова на 0,3 м.

У конструкції електробуса проекту sV-04 підтипу ONC-C застосована колісна формула 6x2.1, яка забезпечує можливість встановлення тягових АКБ необхідної енергопотужності для подолання заданого денного автономного пробігу без їх підзаряджання при великій номінальній пасажиромісткості (124 чол.). Окрім того, така ходова частина сприяє зменшенню руйнівної дії на покриття міських вулиць з огляду навіть на допустиму повну масу тримостових колісних транспортних засобів на рівні $[M_n] = 26000$ кг. Відносними недоліками цих електробусів являються велика довжина кузовів, яка дещо погіршує їх маневреність, особливо на вузьких міських вулицях, наявність високого рівня підлоги у доволі довгій задній частині пасажирського салону та більш інтенсивне зношення шин підтримуючого моста. Проте, оскільки коефіцієнти експлуатаційної ефективності електробусів проектів sV-01 та sV-04 суттєво менші ніж електробусів проектів sV-02 та sV-03 (відповідно, на 11,3 % та 2,3 %), їх створення та експлуатація видаються не доцільними.

Висновки

Електробуси підтипу ONC-C на основі колісних формул 4x2.2 або 4x4.1 з допустимою повною масою 18000 кг практично не прийнятні для застосування у системах міських перевезень пасажирів.

Для проектування, організації дрібносерійного виробництва та експлуатації на міських маршрутах серед розглянутих варіантів міських електробусів типу ONC оптимальними створення і організації виробництва в Україні являються:

- електробуси підтипу ONC-V проекту sV-02 на маршрутах із середньою інтенсивністю пасажиропотоків;
- електробуси підтипу ONC-T проекту sV-03 на маршрутах з великою інтенсивністю пасажиропотоків (найбільш прийнятний варіант з огляду на необхідні обсяги капіталовкладень).

Міські електробуси підтипу ONC-V на даний час створюються багатьма провідними автобусовиробниками і вважаються найбільш оптимальними для перевезень пасажирів на міських маршрутах [6]. Хоча, їм властиві суттєві недоліки, зокрема, необхідність дорогих станцій заміни розряджених блоків тягових АКБ, що потребує відповідного часу.

Міські електробуси підтипу ONC-T у минулому столітті уже застосовувалися для перевезень пасажирів [8]. Спробу відновити їх застосування завдяки моделі ПК ТС-6218 "Пионер" наразі не можна вважати вдалою. Але запропонований проект sV-03 заслуговує на втілення, оскільки у його конструкції відсутні ті недоліки, які були озвучені щодо проекту ПК ТС-6218. Причип електробуса проекту sV-03 не потребує проведення операцій з від'єднання та під'єднання до кузова електробуса-тягача, які вважаються доволі небезпечними. Крім того, його загальна довжина з причепом суттєво менша, а номінальна пасажировмістимість становить 103 чол., що на 18 більше ніж у опонента. Спроби використання причепів для розміщення автономних джерел електричної енергії продовжуються і в інших країнах. Зокрема, у червні 2020 року на одному з маршрутів голландського міста Роттердама почалася підконтрольна експлуатація електробусів з одномостовими причепами, у яких розміщені паливні водневі елементи [9].

Застосування колісної формули 6x2.1 забезпечує створення перспективних міських електробусів особливо великого класу підтипу ONC-C з номінальною пасажировмістимістю до 124 чол., які придатні для експлуатації як на загальних міських маршрутах, так і на маршрутах з виділеними смугами руху. Такі електробуси повинні застосовуватися, перш за все, у великих містах на маршрутах, які характеризуються пасажиропотоками з дуже великою середньою щоденною інтенсивністю.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Войтків С. В. Напрямки створення конкурентоспроможних міських електробусів великого класу. Зб. наук. матер. міжнар. наук.-практ. ін.-конф. "Інноваційні технології розвитку та ефективності функціонування автомобільного транспорту". Кропивницький : ЦНТУ, 2019. С. 13-24.
2. Войтків, С. В. Шляхи покращення економічних показників перспективних міських електробусів. Автомобіль і електроніка. Сучасні технології: Електронне наук. спец. видання. Харків : ХНАДУ, 2018. № 14(4). С. 12-21.
3. Axles & Transmission for the Future of Bus & Truck. Overview to Product Portfolio. URL: <https://bristaxle.com/products/> (дата звернення: 01.04.2022).
4. Єдині технічні приписи щодо офіційного затвердження транспортних засобів категорій M2 та M3 стосовно їхньої загальної конструкції : Правила ЕЭК ООН № 107-02. [Чинний з 01.07.2009]. ООН, 2011.
5. "Пионер". Низкопольный электробус с использованием МАС. URL: <http://pk-ts.org/produkcija/pioner/> (дата звернення 05.11.2019).
6. Kim J., Song I., Choi W. An Electric Bus with a Battery Exchange System. Energies, 2015. № 8. P. 6806-6819. <https://doi.org/10.3390/en8076806>.
7. Battery swapping for electric buses in Qingdao. URL: https://www.phoenixcontact.com/assets/downloads_ed/local_gb/web_dwl_promotion/5733e.pdf (дата звернення 05.11.2019).
8. Кочевлов В. П. Электромобили за рубежом. Автомобильная промышленность, 1979 № 5. С. 30-32.
9. Only with trailer: VDL Citea electric with Fuel Cell Range-Extender for Connexxion (NL). URL: <https://www.urban-transport-magazine.com/en/only-with-trailer-vdl-citea-electric-with-fuel-cell-range-extender-for-connexxion-nl/> (дата звернення 05.05.2022).

Войтків Станіслав Володимирович – канд. техн. наук, Заслужений машинобудівник України, генеральний конструктор, ТЗОВ "Науково-технічний центр "Автополіпром", м. Львів, e-mail: voytktivsv@ukr.net.

Voytktiv Stanislav V. – Cand. Sc. (Eng), The deserved machine engineer of Ukraine, general designer "Scientific and technical center "Autopoliprom", e-mail: voytktivsv@ukr.net.