

ИЗСЛЕДВАНЕ СТРУКТУРАТА НА ЕЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕ НА ТРОЛЕЙБУСИ МОДЕЛ SOLARIS TROLLINO 12 ŠKODA

Георги Димитров

gdimitrov@vtu.bg

Висше транспортно училище „Тодор Каблешков”

гр. София, ул. „Гео Милев” 158

РЕПУБЛИКА БЪЛГАРИЯ

Ключови думи: Градски електрически транспорт, Тролейбуси Solaris Trollino, Структура на електропотребление.

Резюме: Един от стратегическите приоритети на Европейския съюз е намаляване на вредните емисии, отделяни в атмосферата и подобряване качеството на въздуха в градовете с многохилядно население. Като част от цялостната програма на ЕС за постигане на устойчиви резултати в тази насока, е и все по-масовото използване на електрически транспортни средства за придвижване в тези градове, в това число такува и за обществен градски транспорт.

В настоящата разработка са представени резултати от проведено изследване върху структурата на електроенергийно потребление на тролейбуси модел Solaris Trollino III 12 Škoda, експлоатирани от „Тролейбусен транспорт” ЕООД, гр. Плевен. Електроенергийните измерванията са проведени в реални експлоатационни условия, разделно за основните потребители на енергия в тролейбусите, с цел по-детайлно анализиране на тяхното влияние върху общото енергийно потребление. Получените данни за електроенергийното потребление на отделните групи потребители са аналитично обработени за целите на изследването. Резултатите са представени под формата на таблици и графики. Извършен е анализ на структурата на електропотребление на изследваните тролейбуси и са формулирани конкретни изводи.

ВЪВЕДЕНИЕ

Бъдещото развитие на обществения градски транспорт в България е свързано с постепенно преминаване към експлоатация само на електрически транспортни средства /ЕТС/. Последното е продиктувано и от цялостната политика на ЕС по отношение повишаване енергийната ефективност на транспортните средства, намаляване на вредните емисии, отделяни от тях в атмосферата и подобряване качеството на въздуха в големите градове.

В разработката са представени резултати от проведено изследване върху структурата и параметрите на електроенергийно потребление на последно доставените през 2018 г. в гр. Плевен тролейбуси модел Solaris Trollino III 12 Škoda. Този модел следва да се разглеждат като транспортни средства с нулеви емисии, тъй като в тяхното оборудване няма агрегати и системи, използващи като енергиен източник традиционни течни и газообразни горива.

СЪСТОЯНИЕ НА ПРОБЛЕМА И ПРЕДПОСТАВКИ ЗА ИЗСЛЕДВАНЕТО

Към настоящия момент в България тролейбусен транспорт функционира в 10 областни града. В периода 2010–2021 г. с цел модернизация на тролейбусния транспорт в България са въведени в експлоатация нови тролейбуси, по-голямата част от които са модели Škoda 26Tr Solaris III, Škoda 27Tr Solaris III, Solaris Trollino III 12 Škoda и Škoda 27Tr Solaris IV (238 от общо 304 бр. в експлоатация), които са кооперирано производство на Solaris Bus & Coach – Полша и Škoda Electric – Чехия. През тези повече от 11 години са проведени редица изследвания върху параметрите на електроенергийно потребление на част от тези модели тролейбуси [1, 2], като при тях основно са изследвани общия относителен разход на енергия, относителната стойност на върнатата тролейбусната мрежа енергия, както и на относителната енергия за отопление, всички те изчислявани в kWh/km.

Целта на настоящото изследване е чрез диференцирани енергийни измервания в реални експлоатационни условия, детайлно да се анализира структурата на електропотребление и да се определи дяловото участие на основните потребители на енергия в тролейбусите Solaris Trollino III 12 Škoda. В таблица 1 са дадени основните технически данни на тролейбус Solaris Trollino III 12 Škoda, обект на настоящото изследване.

Таблица 1.

Основни технически данни за експлоатираните в гр. Плевен тролейбуси Solaris Trollino III 12 Škoda

Име на модела	Solaris Trollino III 12 Škoda
Шаши и купе	Solaris Urbino 12
Силовое електрообзавеждане	Škoda Electric
Двигател	Škoda 4 ML 3444 K/4
Тип на двигателя	Асинхронен, 4 полюсен
Мощност на двигателя	160 kW
Брой двигатели	1
Мощност на тяговия инвертор	260 kVA
Общ брой оси / Брой двигателни	2 / 1
Вид и мощност на отоплението	Водно, $P_{\max} = 40 \text{ kW}$
Ел. мощност на климатика	$P_{\max} = \sim 9\text{-}10 \text{ kW}$
Алтернативно захранване	Тягова акумулаторна батерия
- номинално напрежение	327,6 Vdc
- номинална мощност/енергия	20,4 kWh използваема енергия
Маса на возилото / Обща маса	11340 kg / 18000 kg

При тролейбусите Solaris Trollino III 12 Škoda е възможно разделно измерване на енергиите на основните потребители, тъй като те са оборудвани от производителя с бордова микропроцесорна система за измерване и съхраняване на електроенергийното потребление на отделните им системи, а също така и на общо генерираната енергия от тяговия инвертор при рекуперативно спиране и тази върнатата в тяговата мрежа. За първи път е възможно провеждане на изследване с такъв обхват, чрез използване на специализиран фирмен софтуер, с който разполага експлоатационното предприятие „Тролейбусен транспорт“ ЕООД – Плевен, позволяващ всички тези енергии да бъдат прочетени от паметта на компютъра за последваща детайлна аналитична обработка.

СТРУКТУРА НА ЕЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕ НА ТРОЛЕЙБУСИТЕ

В структурно отношение, електропотреблението на ЕТС, в частност на тролейбусите, се разделя най-общо на такова за тягови и нетягови нужди. От своя страна енергията за нетягови нужди може допълнително да се раздели между две функционално обособени групи потребители: енергия за технически нужди пряко свързани с движението (вентилатори за охлаждане на силовото електрообзавеждане; компресори за сгъстен въздух; устройства за зареждане на акумулаторни батерии и захранване на веригите за управление; спомагателни задвижвания и др.) и енергия за осигуряване на комфортни условия на пътуване (уредби за отопление, вентилация и климатизация на салоните за пътници).

За провеждане на енергийни анализи, наред с данни на енергийно потребление на тролейбусите е необходимо и познаване на техните силовите схеми. На фиг. 1 е показана блокова схема на силовите вериги и преобразувателите в шкаф – покривно оборудване SJ10 на тролейбус Solaris Trollino III 12 Škoda [3].

На схемата се вижда, че при този модел тролейбуси има значителен брой системи, енергийното потребление на които е целесъобразно детайлно да бъде изследвано. Също така при тях като опция е осигурена и възможност за захранването им от алтернативен източник вграден в тях, а именно дизелов генератор или тягова акумулаторна батерия /ТАБ/, зареждана от тролейбусната мрежа. При конкретно изследваните тролейбуси, автономното им захранване се осигурява от Li-Ion тягова акумулаторна батерия с разполагаем капацитет 20,4 kWh.

РЕЗУЛТАТИ ОТ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНОТО ИЗСЛЕДВАНЕ

В изследването са включени 5 броя тролейбуси от модел Solaris Trollino III 12 Škoda (съкр. Trollino III 12S), експлоатирани в град Плевен. Изследването обхваща пълния период на експлоатация на изследваните тролейбуси (около 37 месеца – от август 2018 до септември 2021 г.), през който те са обслужвали всички тролейбусни маршрути в града.

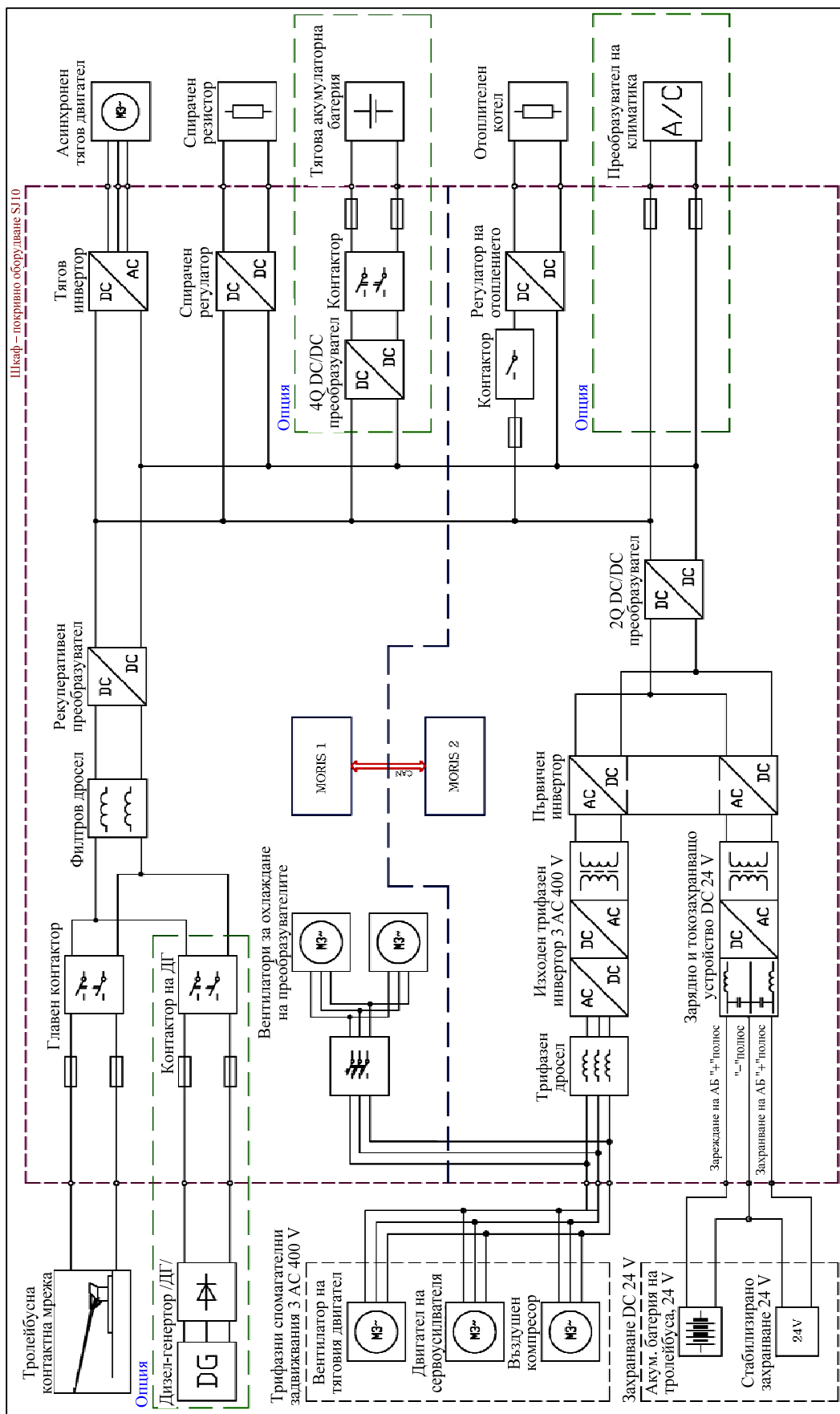
В таблица 2 са показани данните за енергийния баланс на тролейбусите [4], а именно: общо електропотребление E_{cat} от тролейбусната мрежа /ТМ/; върната в тяговата мрежа енергия $E_{r cat}$; нетна консумация на енергия от мрежата $E_{n cat}$, както и потреблението на тяговото задвижване E_{trac} и общото потребление от ТМ на нетяговите потребители $E_{no trac cat}$. Последното е определено като разлика между $E_{n cat}$ и E_{trac} . На фиг. 2 е показана диаграма на средния относителен дял на енергията за тягово задвижване и консумираната от тролейбусната мрежа енергия за нетягови нужди.

Таблица 2

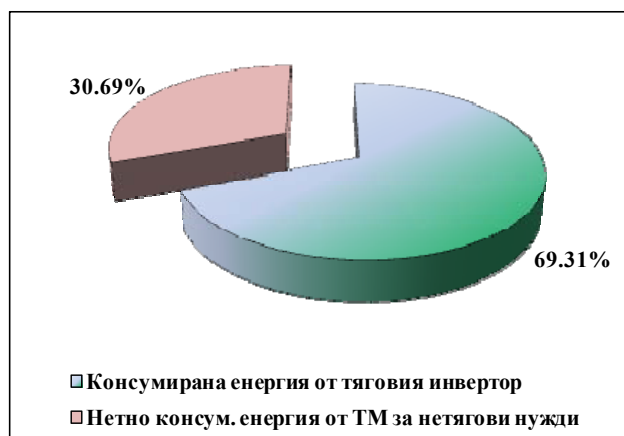
Данни за общото електропотребление от ТМ, върната в тяговата мрежа енергия, потреблението на тяговото задвижване и общото потребление от ТМ на нетяговите потребители

Инв. №	Модел тролейбус	Пробег km	E_{cat} kWh	$E_{r cat}$ kWh	$E_{n cat}$ kWh	E_{trac} kWh	$E_{no trac cat}$ kWh	e_{trac} kWh/km	$e_{no trac cat}$ kWh/km
243	Trollino III 12S	143684	270954	33027	237927	165009	72918	1.148	0.507
245	Trollino III 12S	148496	286951	38566	248385	173442	74943	1.168	0.505
246	Trollino III 12S	151343	304634	47444	257190	187090	70100	1.236	0.463
249	Trollino III 12S	149679	286288	32902	253386	169175	84211	1.130	0.563
250	Trollino III 12S	163571	328073	43266	284807	193640	91167	1.184	0.557
Средно		151355	295380	41106	256339	177671	78668	1,174	0,520

От диаграмата на фиг. 2 се вижда, че средно над 30% от нетно консумираната енергия от тяговата мрежа се консумира от нетяговите системи на тролейбусите.



Фиг. 1. Блоксхема на силовите вериги и преобразувателите в шкаф – покривно оборудване SJ10 на тролейбус Solaris Trollino III 12 Škoda



Фиг. 2. Диаграма на средния относителен дял на енергията за тягово задвижване и нетно консумираната от тролейбусната мрежа енергия за нетягови нужди

Този сравнително висок дял на нетяговото потребление е по-детайлно изследван, с цел установяване участието на всяка система в общото потребление на енергия от изследваните тролейбуси.

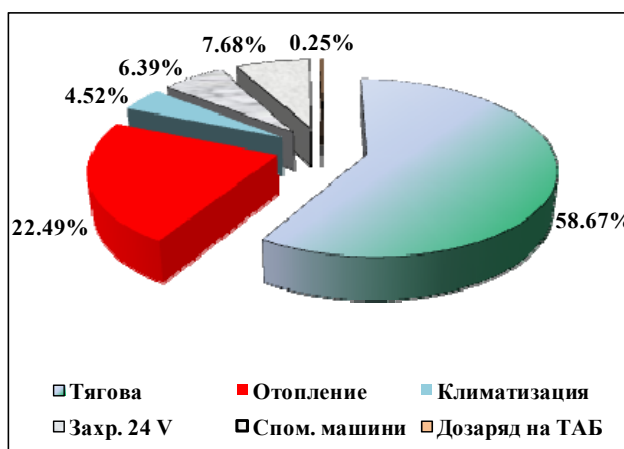
В таблица 3 са показани данните за консумираната електроенергия от основните системи на тролейбусите: тягова – E_{trac} ; отопление – E_{heat} ; климатизация – E_{clima} ; захранване 24 V – E_{ch} ; спомагателни машини – E_{aux} ; дозаряд на ТАБ – $\Delta E_{ch bat}$ [4].

На фиг. 3 е показана диаграма на средния относителен дял в потреблението на електроенергия на тези системи.

Таблица 3

Данни за електроенергийното потребление за тяга, отопление, климатизация, захранване на веригите 24 V, спомагателни задвижвания и дозареждане на тяговата акумулаторна батерия

Инв. №	Модел тролейбус	E_{trac}	E_{heat}	E_{clima}	E_{ch}	E_{aux}	$\Delta E_{ch bat}$
		kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh
243	Trollino 12	165009	62250	12674	17213	22908	601
245	Trollino 12	173442	61086	13519	19266	25381	655
246	Trollino 12	187090	64680	13641	18941	23035	910
249	Trollino 12	169175	68741	15085	19395	21716	723
250	Trollino 12	193640	83710	13517	21894	23185	953
Средно		177671	68093	13687	19342	23245	768



Фиг. 3. Диаграма на средния относителен дял в потреблението на електроенергия на основните системи на тролейбусите

От диаграмата на фиг. 3 се вижда, че значителен дял в потреблението на енергия заема тази за отопление 22,49%, като дялът на преките технически нужди е около 14,1%.

В таблица 4 са показани данните за консумираната от тяговия инвертор енергия E_{trac} и генерираната от него енергия при електродинамично спиране $E_{r\ trac}$, както и енергията погасена в спирачния резистор E_{br} , енергията върната в тяговата мрежа и съхранена в тяговата акумулаторна батерия – E_r^* и общо консумираната регенеративна енергия от нетяговите системи на тролейбуса – E_{int} .

Таблица 4

Данни за консумираната и генерираната при електродинамично спиране енергии от тяговия инвертор и относителното оползотворяване на регенеративната енергия

Инв. №	Модел тролейбус	E_{trac}	$E_{r\ trac}$	E_{br}	E_r^*	E_{int}	$E_{r\ trac}$	E_r^*	E_{br}	E_{int}
		kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	% E_{trac}	% $E_{r\ trac}$	% $E_{r\ trac}$	% $E_{r\ trac}$
243	Trollino 12	165009	76550	5150	34806	36594	46,39%	45,47	6,73	47,80
245	Trollino 12	173442	80623	5070	40371	35182	46,48%	50,07	6,29	43,64
246	Trollino 12	187090	92507	5282	49904	37321	49,45%	53,95	5,71	40,34
249	Trollino 12	169175	75547	5254	34374	35919	44,66%	45,50	6,95	47,55
250	Trollino 12	193640	90501	5248	46077	39176	46,74%	50,91	5,80	43,29
Средно		177671	83146	5201	41106	36838	46,80%	49,44	6,26	44,31

На фиг. 4 е показано средното относително разпределение на регенеративната енергия $E_{r\ trac}$ между спомагателните системи, спирачния резистор и тази върната тяговата мрежа и съхранена в ТАБ на изследваните тролейбуси.



Фиг. 4. Диаграма на средното относителното разпределение на регенеративната енергия между вътрешните потребители, спирачния резистор и тази върната тяговата мрежа и съхранена в тяговата акумулаторна батерия

От данните в таблица 4 и диаграмата на фиг. 4 се вижда, че средно около 46,8% от енергията за тяга се генерира обратно при електродинамично спиране, а 44,31% от регенерираната енергия се консумира от нетяговите системи на тролейбуса.

АНАЛИЗ НА РЕЗУЛТАТИТЕ ОТ ИЗСЛЕДВАНЕТО И ОСНОВНИ ИЗВОДИ

Събраните по експериментален път енергийни данни и получените резултати след тяхната аналитична обработка позволяват да се направят следните изводи, относно структурата и параметрите на електропотребление на изследвания модел тролейбуси Solaris Trollino III 12 Škoda, експлоатирани в гр. Плевен:

- Средният относителен дял на нетно консумираната от тролейбусната мрежа енергия за тягови нужди е 69,31%, а този на нетяговата – 30,69%. Високият дял на нетяговата енергия се дължи основно на системите за отопление и климатизация.

- Средният относителен дял на енергиите за отопление през зимата и за вентилация и климатизация през останалия период са съответно 22,49% (68093 kWh) и 4,52% (13687 kWh). Много по-високата стойност на разхода за отопление е следствие на по-ниския коефициент на ефективност на преобразуване на енергията (COP – Coefficient of Performance) на водното отопление – около 0,96, спрямо този на компресорната термopомпа – около 2,2-2,5. Също така, компенсираният през зимните месеци средна температурна разлика е по-голяма от тази през летните [5], което от своя страна изисква и повишен разход на енергия за отопление.

- Средният относителен дял на генерираната от тяговия инвертор енергия при електродинамично спиране спрямо консумираната от него за задвижване на тролейбусите е 46,80%, което показва висока ефективност на електродинамичния спирачен процес.

- Средният относителен дял на върнатата в тяговата мрежа и съхранена в тяговия акумулатор енергия спрямо тази, генерирана от тяговия инвертор при електродинамично спиране, е 49,44%. Като основна причина за това може да се посочи, че значителна част от регенеративната енергия се консумира от различните системи в тролейбуса (средно 44,31%). Средният дял на неефективно използваната регенеративна енергия, отделена под формата на топлина в спирачния резистор, е 6,26%.

- Средният дял на „зелената“ енергия (ефективно оползотворената енергия генерирана от тяговия инвертор при електродинамично спиране) е около 20% от общата консумация на енергия от тролейбусната мрежа, което от своя страна означава 20% спестени емисии от производство на електроенергия.

Резултатите от проведеното изследване показват, че средният относителен нетен общ разход на енергия е около 1,7 kWh/km (виж табл. 2), който съпоставен с този на съвременен дизелов 12-метров градски автобус (~3,4 kWh/km) е около 2 пъти по нисък. Съществуват и възможности за допълнително оптимизиране разхода на тролейбусите.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За устойчиво подобряване качеството на атмосферния въздух в големите градове е необходимо постепенното преминаване към експлоатация на енергийно ефективни и екологични превозни средства, каквито са електрическите. Последното ще доведе и до намаляване зависимостта на обществения градски транспорт от традиционните течни и газообразни горива.

Следва да се отбележи, че въпреки значителните инвестиционни разходи за закупуване на нови енергийно ефективни електрически транспортни средства за обществен градски транспорт и тези за изграждането на необходимата хранваща инфраструктура, единственият път за разрешаване на проблема със замърсяването на въздуха в големите градове е все по-широкото използване на тролейбуси и електробуси, които да заменят използваните в момента дизелови автобуси, а в по късен етап и тези използващи като гориво природен газ.

Към момента водещ в това отношение у нас е гр. Плевен с 54 тролейбуса и 14 електробуса Yutong E12 (ZK6128BEVG), с дял около 90% в транспортната мрежа на града. Очаква в началото на 2024 г. 100% от обществения транспорт в града да стане изцяло електрически. В останалите 9 града с функциониращ тролейбусен транспорт, е целесъобразно той да се запази и в бъдеще, като в градовете Русе, Сливен и Хасково следва да се обнови морално остарелия тролейбусен парк. Следва също така да се отбележи, че към август 2022 г. в още 7 града у нас, от тях 4 и с тролейбусен транспорт,

са в експлоатация 160 броя електробуси, като към момента техният дял е между 5 и 12 процента от необходимия брой автобуси за изпълнение графика за движение.

В заключение може да се каже, че от 2019 г. в България е налице трайна тенденция към непрекъснато увеличаване броя на градовете експлоатиращи електробуси, както и дела на транспортната работа извършвана с тях.

ЛИТЕРАТУРА:

- [1] Павлов Г., Г. Димитров, Анализ на ефективността на рекуперативните спирачни системи на тролейбуси Škoda Solaris в реални експлоатационни условия, Научно списание „Механика, транспорт, комуникации”, ISSN 2367-6620 (online), том 14, бр. 3/2, 2016 г., X-31 – X-31, статия № 1380, <https://mtc-aj.com/library/1380.pdf>
- [2] Tomcheva M., I. Tarpov. Study of the Power Modes of Skoda Solaris 26Tr and 27Tr Trolleybuses, 2021 17th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), 1-4 July 2021, Sofia, Bulgaria, Publisher: IEEE, DOI: 10.1109/ELMA52514.2021.9503018, <https://ieeexplore.ieee.org/document/9503018>
- [3] Техническа документация на тролейбус Solaris Trollino III 12 Škoda, Škoda Electric a.s., 2018 г.
- [4] Данни за експлоатационния разход на енергия на тролейбуси Solaris Trollino III 12 Škoda, „Тролейбусен транспорт” ЕООД, Плевен, 2021 г.
- [5] Месечни хидрометеорологични бюлетини, НИМХ – БАН, 2018-2021 г.

RESEARCH OF THE STRUCTURE OF ELECTRICITY CONSUMPTION OF TROLLEYBUSES MODEL SOLARIS TROLLINO 12 ŠKODA

Georgi Dimitrov
gdimitrov@vtu.bg

*Todor Kableshkov University of Transport
Sofia, 158 Geo Milev Str.
THE REPUBLIC OF BULGARIA*

Key words: *Urban electric transport, Trolleybuses model Solaris Trollino, Structure of electricity consumption.*

Abstract: *One of the strategic priorities of the European Union is the reduction of harmful emissions emitted into the atmosphere and improvement of air quality in the cities with many thousands of population. As part of the EU's overall program to achieve sustainable results in this direction, there is also the increasing use of electric vehicles for movement in these cities, including those for public urban transport.*

The paper presents the results of a study conducted on the structure of electricity consumption of Solaris Trollino III 12 Škoda trolleybuses, operated by "Trolleybus transport" EOOD – Pleven city, Bulgaria. The electrical energy measurements were carried out in real operating conditions, separately for the main energy consumers in the trolleybuses, in order to analyze in more detail their effects on the total energy consumption. The obtained data on the electricity consumption of the individual groups of consumers have been analytically processed for the purposes of the study. The results are presented in the form of tables and graphs. An analysis of the structure of electricity consumption of the studied trolleybuses was carried out and specific conclusions were formulated.