

INTEGRATING INTELLIGENT MONITORING SYSTEMS IN RAIL TRANSPORT

Abstract: A major task solved by transport systems is traffic safety. The specificity of rail transport is the high weight of the railway compositions and the long braking paths, which are commensurate with and surpass the area of natural visibility. For this reason, the safety of the train is not only provided by the subjective factor (driver, dispatcher, traffic supervisor), but also entrusted to technical means which, in the event of failure and misconduct by the operator, cause the traffic to stop despite operating conditions not to impose it. For these technical means it is perceived to have been said to have fail-safe behavior.

Author information:

Plamen Dyankov
Assoc. Prof. DSc eng.
Faculty of Technical Sciences
Konstantin Preslavsky – University of Shumen
✉ p.dqnkov@shu.bg
🌐 Bulgaria

Emil Zechev
Student at
Konstantin Preslavsky – University of Shumen
🌐 Bulgaria

Keywords:

track circuits, interoperability, inertial systems

Увод

Съвременната логистика според повечето автори се разпростира от сферата на първичното добиване на суровините, тяхната преработка, обогатяване и транспортиране, производството на нови продукти, дистрибутирането и реализацията им до тяхното трансформиране във вторични суровини, както и вливането им в нов цикъл на възпроизводство [1]. От това определение се вижда, че през по голямата част от логистичния цикъл стоките и суровините са в процес на транспортиране. За по – ефективно управление на логистичните процеси се използват съвременни технологии за глобално позициониране на пратките.

Изложение

Постигането на *fail-safe* поведение е многостранна задача, но най-общо може да се сведе до формиране на достоверна информация за състоянието на включените в системата обекти и тяхното сигурно управление, което е триединен динамичен процес на планиране, изпълнение и контрол на дейности [8]. Позиционирането на влака е основен акцент в първата част на така дефинираната задача.

Много години позиционната задача е решавана индиректно с помощта на релсови вериги и броячи на оси. Тези изпитани средства всъщност осигуряват информация за свободност или заетост на части от железния път, а откриването на определено возило и/или неговото проследяване е правено, чрез решаване на логически задачи в инфраструктурните устройства.

Обективността налага да се отбележи, че за гаровите централизации важната информация е не кое возило се намира в определена зона от коловозното развитие, а дали тя е заета-нещо

повече, същностната информация е дали тази зона е свободна. Подходът да се следи за свободност и заетост на участъци от железния път е приложим и в междугарията. На този принцип са изградени автоматичните блокировки. Съществува неудобството, че междугариято е разделено на фиксирани блок-участъци, всеки със свои средства за контрол на свободността (например релсови вериги). Фиксираните блок-участъци ограничават пакетното движение и в крайна сметка влошават експлоатационните показатели на участъка.

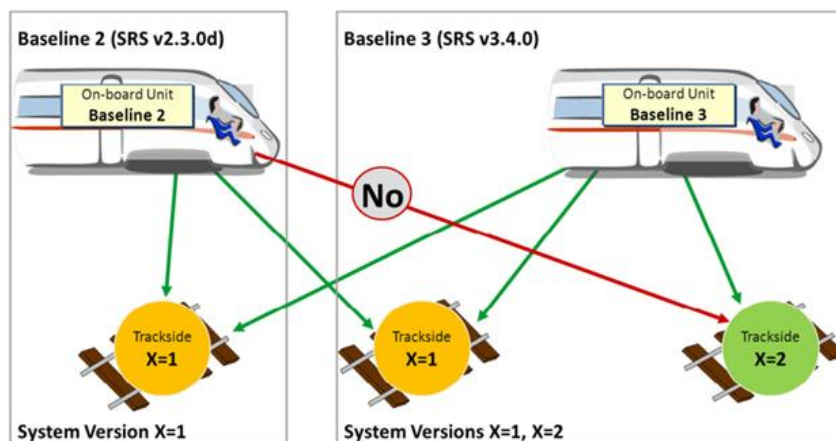
Съществен недостатък на релсовите вериги и броячите на оси, приложени в междугарови условия е, че при тях голямо количество апаратура и кабели са разсредоточени по дължината на железопътната линия, което означава влошена експлоатация, висока цена и ниска надеждност. Последното е особено актуално за релсовите вериги. Те изискват специални мерки за поддържане на чиста баластова призма и чрез това да се гарантира висока стойност на минималното изолационно съпротивление.

Компонентите на релсовите вериги (дроселтрансформатори, съединителни въжета, релсови съединители), всички изнесени апаратни точки (шкафове, кабини), както и самите кабели понякога са обект на грабителство и вандализъм. Успоредно с това междугаровите осигурителни системи са силно свързани с вида на използваните релсови вериги. Често преобладаващата част от апаратурата за автоматично регулиране на движението обслужва проблеми на самите релсови вериги (например защита от късо съединение в изолиращите настави) и имат характеристики, които са предопределени от тях. Това не е единствената, но е една от съществените причини за многообразието на системите за автоматично регулиране на движението, за техния национален или регионален характер.

Решаване на позиционната задача в ERTMS/ETCS

Новата европейска система ERTMS/ETCS, наред с другите задачи, основната от които е интероперабилност търси подходящите решения за откриването и следенето на влаковете. В нейното първо ниво е предвидено да се съхранят всички инфраструктурни устройства и системи, като във влака се доставя точково изпреварваща информация от тях. В контекста на настоящата тема това означава, че продължава използването на релсови вериги и/или броячи на оси. Релсовите вериги и броячите на оси се запазват и на второто ниво на ERTMS/ETCS, но вече само като първичен датчик на заетост. Управлението е съсредоточено в радио блок-центрове, които събират информация от гаровите централизации, релсовите вериги и броячите на оси, формират и предават по радиото управляващи команди към всички влакове в зоната на центъра. Днес болшинството европейски страни са преминали първото ниво на ERTMS/ETCS и работят интензивно по внедряване на второто ниво [5].

Преходът към следващо ниво е свързан с нови съществени промени. Фиксираните блок-участъци е необходимо да бъдат заменени с подвижни и това е съществена причина за отказване от релсовите вериги и броячите на оси. В замяна на последните месторазположението на влаковете се определя с инерциални средства. С влакови сензори се следи изминатия път, скоростта и ускорението. Чрез първия показател се определя разстоянието от фиксирана начална точка, а чрез втория и третия се прогнозира времето, след което влакът може да се окаже пред затворен сигнал или друго препятствие. Тази елементарна логика всъщност е доста трудна и скъпа за реализация, тъй като върху движението на влака оказват влияние теглото на състава, наклоните, кривите и разбира се не винаги гарантираната адекватност на човешките реакции. Към това следва да се добавят износването на бандажите и буксуването на колоосите, върху които са разположени датчици.



Фиг.1 ERTMS/ETCS система за сигнализация с бализи

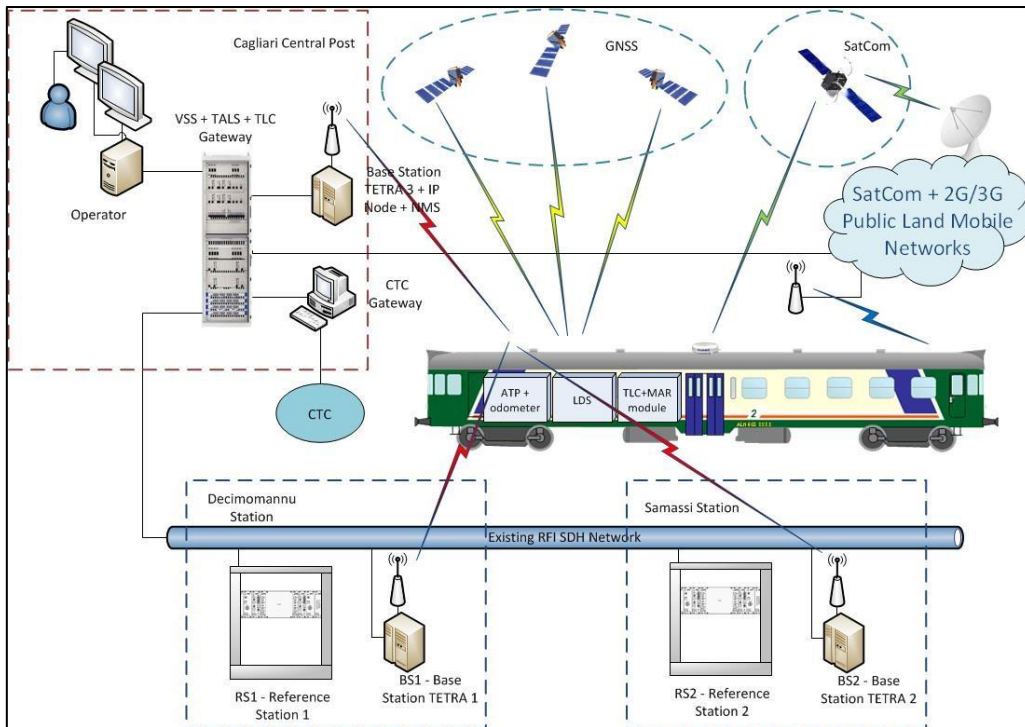
Всички споменати по-горе проблеми се принизяват с периодични корекции в изминатото разстояние. Това става в предварително фиксирани точки от пътя, в които са разположени приемно-предавателни устройства (бализи), преминаването през които нулира натрупаната грешка. Бализите могат да са пасивни и са практически единственото външно съоръжение. Именно те трябва да са унифицирани в цяла Европа (евробализи) за да се постигне главната задача на ERTMS/ETCS. Важен момент при проектирането на системи за автоматично регулиране на движението с евробализи е разстоянието между тях. Колкото са по прецизни инерциалните сензори във влака, толкова бализите може да са на по-голямо разстояние. Позиционната задача се решава в условия на силни механични и електромагнитни смущения и към нея се пределяват *fail-safe* изисквания. Това може да се реализира успешно със сериозно резервиране и алтернативни средства и разбира се с висока цена.

Бализите не са граници на блок-участъците, а само сверяващи репери за инерциалните системи на влака. Допустимото разстояние между попътно движещите се влакове се изчислява в радио блок-центровете въз основа на получавана по радиото информация за преминалите бализи и резултатите от работата на инерциалните позициониращи средства.

Преходът към третото ниво на ERTMS/ETCS е сериозен технически и икономически проблем. Преодоляването му е по-лесно, когато се проектира нов участък, който не е обременен с конвенционални системи и много по-труден, ако функциониращи системи за автоматично регулиране трябва да бъдат демонтирани, въпреки, че не е изчерпан жизнения им ресурс. По тези причини именно страни като Германия и Франция се оказаха в най-неблагоприятна позиция и „само наличието на силна политическа воля и разбиране на дългосрочните ползи от ETCS ще направи възможно повсеместното ѝ внедряване” [5].

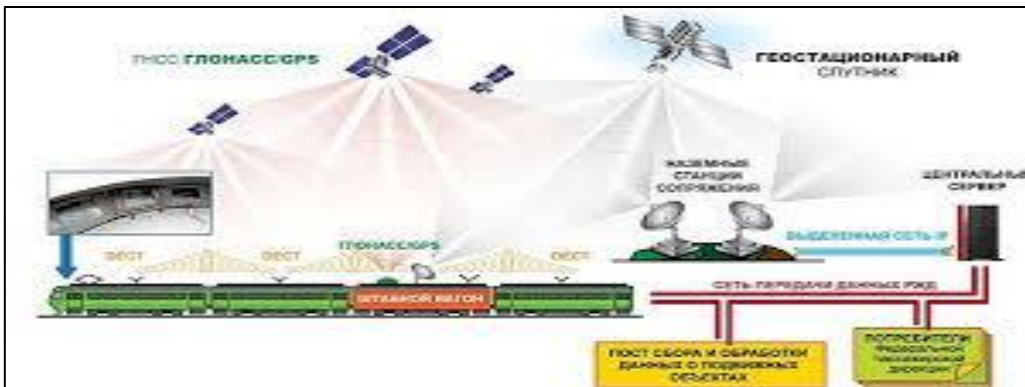
Позициониране с навигационни спътници

Днес най-естественият начин за определяне на месторазположение е да се използват възможностите на глобални позициониращи системи – американската GPS и руската ГЛОНАСС. Предстои стартирането и на трета система – европейската GALILEO. Услугата е безплатна, анонимна, непрекъсната и е достатъчно подвижният обект да бъде снабден с навигационен приемник. Приемниците се произвеждат масово от много производители и цената им е достъпна. От тези големи възможности се ползват много човешки дейности, чело място сред които заема транспорта.



Фиг.2 Европейска позиционираща система GALILEO

Чрез GPS приемници и подходяща комуникация се проследяват влакове и товари. Навлизането на тази нова технология в управление на железопътното движение обаче се бави поради високите изисквания за точност, достъпност, непрекъснатост на обслужването и интегритет на позициониращите системи. Точността на навигационното определение, получено по традиционния кръгов метод е практически еднаква в GPS и ГЛОНАСС.



Фиг.3 Руска позиционираща система ГЛОНАСС

Хоризонталната грешка практически не надхвърля $60 - 100 \text{ m}$. Това се постига чрез едночестотно приемане (в обхвата L1) и обработване на C/A кода в GPS или кода със стандартна точност в ГЛОНАСС. Военните приемници разполагат с по-големи възможности. Те приемат сигналите от спътниците в два честотни обхвата (L1 и L2) и освен споменатите кодове обработват и кодове с висока точност, при което точността се подобрява с около един порядък. Очевидно точността на цивилните приемници не е достатъчна за еднозначното определяне месторазположението на влака, като най-категоричната причина е, че паралелните пътища в междугарието, както и съседните коловози в гарите са на няколко метра един от друг.

Ефективно средство за подобряване на точността е прилагането на диференциална корекция. Комерсиално достъпните GPS приемници достигат в режим на локална

диференциална корекция (с RTCM – 104) точност от $\pm 1 m$, при 2σ , за 95 % от времето. При 3σ , точността е $\pm 1,5 m$ за приблизително 99,7 % от случаите, а при 5σ - $\pm 2,5 m$ за 99,9999 % от случаите [4]. Тази точност изглежда достатъчна за разграничаването на състави върху съседни коловози, но тя може да се постигне при добра спътникова видимост поне на шест спътника и добре разположено съзвездие над хоризонта ($HDOP < 1,5$).

Постигането на достатъчно голям брой видими спътници може стане чрез комбинирани приемници, които приемат и обработват сигналите, излъчвани както от GPS спътниците, така и от космическия сегмент на ГЛОНАСС. Съвместното използване на двете системи ги превръща в елементи на глобална навигационна спътникова система GNSS, чиято първа реализация е EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay System) .

EGNOS функционира от 2004 г. и използва три геостационарни спътника разположени над определени точки, така че да покриват континента. Трите спътника излъчват GPS-подобни сигнали, и заедно със сигналите от GPS и ГЛОНАСС се приемат с обща антена от EGNOS навигационни приемници и участват в позиционното определение. Земният сегмент на EGNOS определя широко зона диференциална корекция, която чрез приемо-предавателни станции се зарежда в EGNOS спътниците. Последните от своя страна доставят данните на EGNOS приемниците по цивилния канал на GPS. Чрез EGNOS точността на позициониране се подобрява до няколко метра но предвид на големите покривани територии не е равностойна на локалната корекция. [3].

Втората реализация на GNSS е бъдещата система GALILEO. Това е независима глобална позиционираща система с 30 средноорбитални спътника, в която цивилните потребители ще имат достъп до пълния ѝ капацитет. Крайните устройства ще приемат диференциална корекция по GSM-R мрежата, което ще позволи точността да достигне $1m$ [3]. Много висока точност (от порядъка на сантиметри) се постига с т.н. RTK (Real Time Kinematics) метод, но при него има голяма неопределеност и не е удобен за самостоятелно позициониране. Точни позиционни резултати се получават и при прилагане на постпроцесни алгоритми, които обаче, трудно се съвместяват с динамичните условия на транспорта.

Достъпност и непрекъснатост на обслужването

За постигането на достатъчна за управлението в ж.п. транспорта точност при позиционното определение са нужни поне шест спътника. В [4] е описан експеримент, проведен през 2004 г. на петнадесет километров случайно избран участък в Белгия. При проведени 7800 позиционни измервания, приемникът (*PolaRx2*) е „виждал” шест GPS спътника само при 69% от случаите. Четири видими спътника са били на разположение в 89% от сеансите. Причините за този песимистичен резултат са основно дървета и други естествени прегради, създаващи каньонен ефект. Тези резултати не бива да се абсолютизират и да се пренасят за всички железопътни линии в света, но едва ли са и изключение. Руският оператор ГЛОНАСС години наред поддържа в орбита между 7-9 спътника. Комбинираният приемник е по сложен, тъй като въпреки привидното сходство между GPS и ГЛОНАСС двете системи се различават по начина на разделяне на каналите, по кодовите комбинации и по бордовите скали на времето. От своя страна Пентагонът гарантира поддържането в орбита на 24 GPS спътника за 70% от времето, а на 21 спътника – за 98% от времето.

EGNOS също не е панацея. За нея по литературни данни [3] рискът да няма непрекъснато приемане на сигнали за всеки интервал от $150s$ е 8.10^{-5} , а локалната достъпност е $0,99$. В споменатият по горе експеримент е констатирано, че за географските дължини на Белгия, геостационарните EGNOS спътници са видими само за около 30% от времето поради ниската елевация (приблизително 30°).[7] Все пак EGNOS е развивана за други цели (основно за управление на полетите) и нейната достъпност навсякъде в Европа не е достатъчна и константна.

Интегритет

Интегритетът на една радионавигационна система се характеризира със способността на системата да открива свое неправилно функциониране и да изключва възможността за използването ѝ в случаи, когато работните характеристики излизат извън допустимите граници. Числено интегритетът на системата се оценява с вероятността за оповестяване на потребителите за нарушаване работата в пределите на допустимия интервал от време. Възможности за оповестяване на нарушен интегритет има както в GPS, така и в ГЛОНАСС, но изпращаната информация, освен че е ограничена се актуализира рядко – не по често от 6-12 h. Най-общо, в съществуващите глобални позициониращи системи „не се гарантира качество на обслужването и интегритет на системата, поради което за високоотговорни приложения е необходимо да се използват EGNOS и GALILEO” [3]. Рискът за загуба на интегритет в EGNOS е $2 \cdot 10^{-7}$, а времето за издаване на сигнал за оповестяване на отказ е 6s. Информация за интегритета на GALILEO е предвидена в службата ѝ SoL (*Safety of Life*). В нея за приложения свързани с безопасността на железопътния транспорт е предвидено отделно ниво – А. *Основните параметри на ниво А са:*

Точност (2σ) - 4m;

Интегритет:

граница, над която се издава сигнал за оповестяване - 20m;

време за издаване на сигнал за оповестяване - 6s;

риск за загуба на интегритета (за всеки интервал от 150s) - $3,5 \cdot 10^{-7}$

Риск за загуба на непрекъснатостта на измерването (за всеки интервал от 15s) - $8 \cdot 10^{-6}$;

Готовност на функцията за контрол на интегритета - 99,5%;

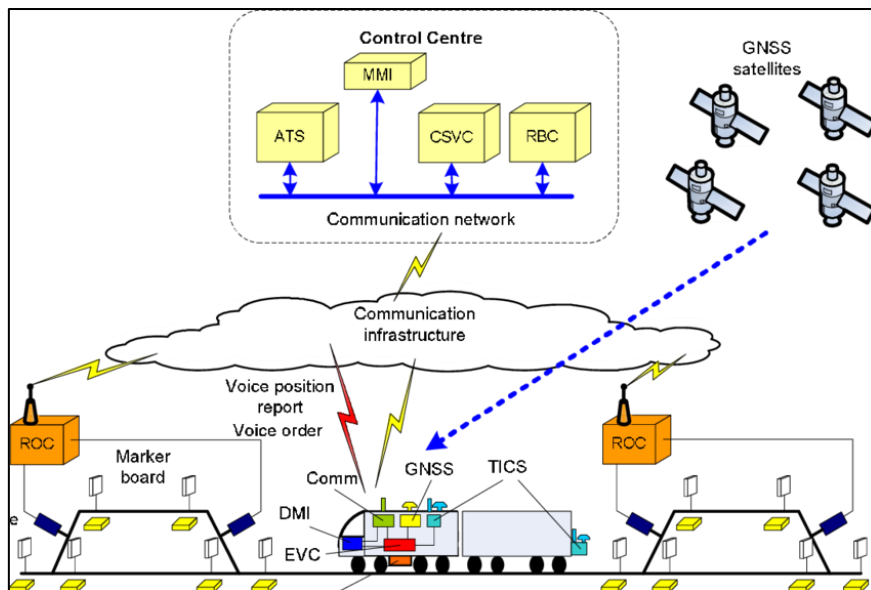
Достъпност при номинална точност - 99,8%. [3].

Позициониране на влакове, линии с малък трафик и натоварени високоскоростни магистралаи.

Концепцията на ERTMS/ETCS е развита с отчитане на необходимостта за внедряване на всякакви линии, в т.ч. на високоскоростни натоварени магистралаи. За позициониране на влаковете в ETCS са нужни много и различни съоръжения – бализи, пътни приемо-предаватели, радиоканал и набор от инерциални сензори на влака. Спътниковата навигация е едно добро допълнение към всичко това, но поради високите изисквания те като правило могат само да сверяват резултатите от работата на иначе неизбежните инерциални сензори. Прилагането на такава система за управление е икономически нерентабилно за еднопътни линии с малка интензивност на движението-за такива линии трудно се доказва рационалното използване и на конвенционални системи за автоматично регулиране. В търсене на подходящото решение е **развит проектът LOCOPROL [7].**

Прилагането на такава система за управление е икономически нерентабилно за еднопътни линии с малка интензивност на движението-за такива линии трудно се доказва рационалното използване и на конвенционални системи за автоматично регулиране. В търсене на подходящото решение е развит проектът LOCOPROL [7].

LOCOPROL не е алтернатива на ETCS, а негов облекчен вариант. Позиционната задача в него се решава само с радионавигационни средства. Предпоставка за това са еднопътните участъци и ниската интензивност на движение. Последното прави подвижните блок-участъци ненужни, а изискванията за точност – доста облекчени.



Фиг.4 Система за автоматично регулиране LOCOPROL

Останалите изисквания, свързани с безопасността – за интегритет, достъпност и непрекъснатост на обслужването остават такива, каквито са те и за ETCS. Основната идея при позиционирането в LOCOPROL е съвместното използване на радионавигационен приемник и цифрова карта на линията. Последното позволява едно елементарно позициониране да се извърши с по-малко от четири видими спътника. Вlakът не може да не е върху линията, а това прави алгоритъмът за позиционното му определение еднодимензионален.

В LOCOPROL е използван хиперболичен метод на позициониране. Навигационният приемник измерва разликата между отдалечеността си от два спътника. Това определя хиперболоидна повърхнина с фокуси в двата приемащи спътника. Местоположението на влака е пресечната точка на хиперболоида и трасето на линията. Всъщност измервателната неточност превръща точката в интервал. За постигане на сигурност се извършват няколко елементарни позиционирания, като се използват други двойки спътници. Общият доверителен интервал е обединение от интервалите на елементарните определения. В [7] е посочено, че с три елементарни определения и използване на три независими двойки спътници се достига необходимото ниво на безопасност (вероятност за опасна работа $10^{-11}-10^{-12}$ $1/h$). Съгласно [4] дължината на доверителния интервал е около $300m$ при добра спътникова видимост и около $700m$ при лоша. Последните резултати са постигнати при позициониране само с GPS спътници и без диференциална корекция.

Заключение

Очевидно е, че днес няма реализирана универсална система за *fail-safe* позициониране, която да е базирана само на навигационни спътници. Причините са във високите изисквания, независимо от това, че всяко едно от тях е преодолимо с достъпните ресурси на съществуващите системи за глобално позициониране и цифрови карти на железопътните линии. Точността може да се постигне с локална или широкозонна диференциална корекция, както и с паралелно следене на фазата на сигнала. Сигурността е достижима чрез едновременно провеждане на няколко единични позиционирания и определяне на общ доверителен интервал. Интегритетът на системата може да се гарантира от системата EGNOS. Лошата спътникова видимост е принудила авторите на LOCOPROL да внесат в процеса на работа корекции в позиционния алгоритъм, като за необходимите три елементарни измервания да не се използват шест спътника, а само четири и разбира се в комбинация [4]. Влизането в експлоатация на GALILEO ще даде нови

възможности. В орбита към спътниците на съществуващата GNSS ще се добавят нови 30. При последните двучестотното приемане на прецизни кодове предполага повишена точност. Възможността да се избира от около 60 спътника, от които поне 20 видими, гарантира осигуряване на трите (а може и повече) независими двойки, необходими за определяне на *fail-safe* общ доверителен интервал. Освен това GALILEO решава удовлетворително изискването за интегритет и непрекъснатост на обслужването. За съжаление, всичко това още не е факт. Програмата GALILEO изпитва трудности и закъснява. Това значи, че по проблема трябва да се работи при днешните реалности, без да се чака стартирането на европейската глобална позиционираща система. Първата възможност е да се замени хиперболичния метод на позициониране с кръгов. Тогава за едно елементарно позициониране е достатъчно разстоянието само до един спътник. Позицията на навигационния приемник е в пресечната точка на сфера с център в наблюдавания спътник и трасето на линията. Промяната е свързана само с механизмите на елементарното измерване и не променя начина за определяне на общия доверителен интервал. При това положение достатъчният брой видими спътници е три. Малкият брой необходими спътници влияе благоприятно върху общите надеждност, достъпност и непрекъснатост на обслужването. Това е предпоставка за достатъчното решаване на позиционната задача с ресурсите само на една глобална система – GPS. Втората възможност е по пълното използване на Доплеровото измерване на скоростта на навигационния приемник. Ако това се прави едновременно по сигналите на поне три спътника може да се разчита на високоотговорна система, която в голяма степен да покрие функциите на бордова инерциална позиционираща система. Независимо от това доминиращата роля на системите за глобално радионавигационно позициониране е предопределена. Те ще заместят голяма част от съществуващите днес инфраструктурни съоръжения и ще маркират качествена стъпка в развитието на железопътния транспорт.

References:

1. Bogdanov A. Analysis of Relationship Between Logistics and Standardization *Association Scientific and Applied Research International Journal* vol. 1. 2013, ISSN 1314-9784, p 59
2. Filip, A., H. Mocek, L. Bazant. GPS/GNSS Based Train Positioning for Safety Critical Application. *Signal+Draht*, (93) №5/2001, p. 51-55
3. Gu, X. Die Machbarkeit von GNSS/Galileo-basierter Zugortung für sicherheitsrelevante Anwendungen. *Signal+Draht* (97) №1-2/2005, p.
4. First LOCOPROL positioning test results on Belgian test track. *LOCOPROL newsletter* Issue №5/August 2004, p. 2-4
5. Lacot, F., J. Pore. ERTMS/ETCS becomes a reality. *Signal+Draht* (96) №10/2004, p. 6-13
6. Mertens, P., J.-P. Franckart, A. Starck. Low-cost signalling on lines. *Railway Gazette International*, August 2003, p. 498-499
7. Simsky, A., F. Wilms, J.-P. Franckart. GNSS-based failsafe positioning system for low-density traffic line based on one-dimensional positioning algorithm. NAVITEC'2004, Noordwijk, Netherlands, 8-10 December 2004
8. Stoyanov, Sv. Management – efficiency and effectiveness. – International scientific refereed indexed online journal with impact factor “SocioBrains”, 2018, Issue 41, <<http://sociobrains.com/bg/top/issues/Issue+41%2C+January+2018-1/>>, 379 – 381, p. 379.