

УДК 629.422

DOI: 10.24160/1993-6982-2023-5-94-101

## Использование возобновляемых источников энергии для гарантированного электроснабжения протяженных железнодорожных линий

В.В. Харченко, Е.В. Гусарова

Рассмотрен новый подход для системы электроснабжения на основе возобновляемых источников энергии на переездах, расположенных на неэлектрифицированных участках железных дорог.

В России насчитывается около 22-х тысяч железнодорожных переездов, и их количество продолжает неуклонно сокращаться. Однако, в силу ряда причин, полностью отказаться от одноуровневых переездов с автоматическим регулированием не представляется возможным. Одной из существенных проблем является отсутствие электроснабжения на переезде. Как правило, такие переезды расположены на неэлектрифицированных участках или удалены от сетей централизованного электроснабжения.

Разработана система электроснабжения на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Проведен анализ, установлено, что на переездах, находящихся на неэлектрифицированных участках, возможно использование солнечных и ветряных электростанций.

**Ключевые слова:** железнодорожный переезд, электроснабжение, возобновляемые источники энергии, вибродатчики, вольтодобавочный источник питания.

**Для цитирования:** Харченко В.В., Гусарова Е.В. Использование возобновляемых источников энергии для гарантированного электроснабжения протяженных железнодорожных линий // Вестник МЭИ. 2023. № 5. С. 94—101. DOI: 10.24160/1993-6982-2023-5-94-101.

## Use of Renewable Energy Sources for Guaranteed Power Supply to Crossings of Long Railway Lines

V.V. Kharchenko, E.V. Gusarova

The article considers a new approach for the power supply system based on renewable energy sources at crossings located in non-electrified railway sections.

There are about 22 thousand crossings in Russia, and their number continues to decrease steadily. But in view of objective reasons, it is not possible to completely do away with automatically controlled single-level crossings, one of such reasons being the lack of electric power supply at the crossing. As a rule, such crossings are located in non-electrified railway sections or are a distance away from centralized power supply networks. A power supply system based on renewable energy sources (RES) has been developed. An analysis was carried out, which has shown that it is possible to use solar and wind power plants at crossings located in non-electrified railway sections.

**Key words:** railway crossing, power supply, renewable energy sources, vibration sensors, booster power supply.

**For citation:** Kharchenko V.V., Gusarova E.V. Use of Renewable Energy Sources for Guaranteed Power Supply to Crossings of Long Railway Lines. Bulletin of MPEI. 2023;5:94—101. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2023-5-94-101.

### Введение

Одна из важнейших сфер общественного производства — транспорт, связывающий между собой производителей и потребителей, производственные предприятия обрабатывающей и добывающей промышленности, сельское хозяйство, военные объекты, различные экономические районы.

В России насчитывается около 22 тысяч железнодорожных переездов. Часть из них находятся на неэлектрифицированных участках или удалены от сетей централизованного электроснабжения. Решением вопроса электроснабжения отдельно стоящих местных, временных, технологических, стихийных, отдельностоящих, расположенных в труднодоступных и удалённых от

электросетей районах переездов может стать использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ).

### Разработка системы электроснабжения на базе возобновляемых источников энергии

Мировая тенденция развития электроснабжения показала рост использования возобновляемой энергетики. Практически на любой территории России есть возможность применения ВИЭ [1 — 3].

Спроектированная для железнодорожных переездов система сигнализации и блокировки работает от напряжения +24 В и состоит из блока управления, датчиков передачи информации, светофоров и линий связи. Блок управления подключен к аккумуляторной

батарея, заряд которой идет от СЭС или ВЭС. В качестве датчиков информации можно использовать два датчика вибрации, первый должен передавать сигнал о приближении подвижного состава к железнодорожному переезду, второй, расположенный за переездом, подавать сигнал о его прохождении.

Информация от датчиков вибрации поступает как по каналам радиосвязи, через передающие и принимающие радиоустройства, так и по проводной линии.

Связь по радиоканалу может осуществляться с помощью модулей XBee, FSO или NOMA для ZIGBEE [4 — 6]. Удалённо расположенные датчики запитаны от отдельных ФЭМ с АБ, а, учитывая малое энергопотребление, их собственная батарея будет меняться один раз в несколько лет [7 — 9]. Система постоянно самодиагностирует датчики и исполнительные механизмы, но требует высокого уровня подготовки специалистов, что не всегда можно обеспечить, особенно на удалённых второстепенных линиях местного или ведомственного назначения.

Наиболее приемлемой автономной системой сигнализации и блокировки для условий России в настоящее время является аналоговая система с проводной передачей сигнала, где источник энергии — СЭС номинальным напряжением +24 В [10]. К СЭС подсоединен контроллер заряда АБ, рассчитываемый по критерию мощности подключённой нагрузки, в которую входят автодорожные и железнодорожные светофоры, блок управления с датчиками вибрации и проводной аппаратурой.

Блок управления напряжением +24 В подключен к АБ. Сигнал от датчиков вибрации, установленных у стыков рельс или в непосредственной близости от железнодорожного полотна, поступает по кабелю или витой паре проводов на блок управления, включающий или выключающий световую сигнализацию.

Разработанная электрическая схема позволяет использовать на светофоре два цвета: для автотранспорта — красный и бело-лунный, для поезда — жёлтый и зелёный.

На железнодорожных линиях IV категории электрическая схема управляет включением для машиниста поезда железнодорожного светофора (ЖС), оповещающего о снижении скорости на данной дистанции пути, где имеется железнодорожный переезд, а при прохождении этой дистанции, включением зелёного света, отменяющего скоростные ограничения, причём оба железнодорожных светофора включаются и выключаются одновременно.

Алгоритм работы автономной системы сигнализации и регулирования на переезде однонаправленной железнодорожной линии следующий: в отсутствие поезда проезд автотранспорта через железнодорожный переезд разрешается, на переезде может гореть бело-лунный свет, но может и не гореть в целях экономии электроэнергии, но и в этом случае проезд разрешен.

При приближении поезда, проходящего мимо первого вибродатчика, последний от вибрации замыкается, подаёт сигнал на блок управления, в результате чего на переезде для автотранспорта загорается красный свет. Одновременно с этим, на первом железнодорожном светофоре, расположенном за первым вибродатчиком, но до переезда, загорается жёлтый свет, предупреждающий машиниста о снижении скорости и готовности к экстренной остановке. Одновременно с первым ЖС загорается второй ЖС с зелёным светом, расположенный за переездом до второго вибродатчика. После прохождения поездом переезда и второго ЖС с зелёным светом скоростные ограничения снимаются, второй вибродатчик подаёт сигнал на блок управления о прохождении поезда. Блок управления отключает оба ЖС, а на автодорожном светофоре выключает красный или включает бело-лунный свет, движение автотранспорта возобновляется.

Структурная схема системы управления световой сигнализации однонаправленного железнодорожного переезда с проводной линией связи и источником энергии от СЭС, изображена на рис. 1.

На рисунке 2 дана разработанная аналоговая электрическая схема блока управления световой сигнализацией, выполненной в виде триггера, на основе двух транзисторов разной проводимости. Алгоритм следующий: при срабатывании датчика вибрации  $SQ1$  цепь замыкается на переключение световой сигнализации, открывается транзистор IRFR3505PBF, а он, в свою очередь, открывает транзистор IRFI4024H-117P, удерживающий транзистор IRFR3505PBF в открытом состоянии, после чего реле включается. При срабатывании датчика вибрации  $SQ2$  цепь замыкается на переключение световой сигнализации, транзистор IRFR3505PBF закрывается, а за ним закрывается транзистор IRFI4024H-117P, реле выключается. Оба датчика вибрации нормально разомкнуты и замыкают цепь при воздействии вибрации. Такой алгоритм позволяет снизить энергетические затраты, поскольку электроэнергия расходуется только в момент замыкания пружины на корпус, по времени одно замыкание протекает в течение 2 мс. К контактам 1.1 — 1.6 реле К1 (рис. 2) подключены линии железнодорожных и автодорожных светофоров напряжением 24 В.

В таблице представлен перечень радиоэлектронных элементов, продемонстрированных на рис. 2.

На схеме рис. 1 2000 м — расстояние от нормально разомкнутого датчика вибрации  $SQ1$  до переезда. Датчик  $SQ2$  нормально разомкнут и расположен за переездом на расстоянии в 800 м. Указанные цифры определены проектом в соответствии с ГОСТ 33893—2016 п. 4.1.2.2 «Требования к реализации функции формирования извещения на переезд», и в каждом отдельном случае устанавливаются индивидуально. Разработанная схема автономного электроснабжения железнодорожных переездов может быть использована на линиях

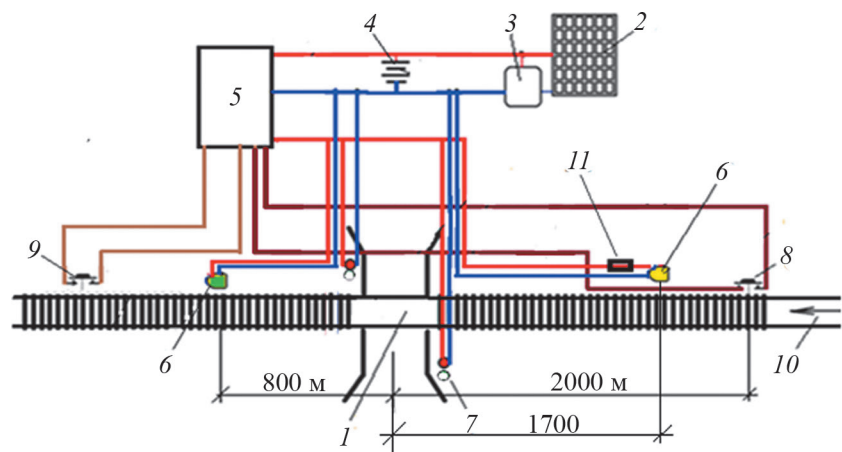


Рис. 1. Структурная схема системы световой сигнализации на ВИЭ однопутного железнодорожного переезда:  
1 — железнодорожный переезд; 2 — фотоэлектрические модули; 3 — контроллер заряда АБ; 4 — аккумуляторные батареи; 5 — блок управления; 6, 7 — железнодорожные и автодорожные светофоры; 8, 9 — датчики вибрации до и после переезда; 10 — направление движения поезда; 11 — вольтодобавочный источник питания (ВДИП)

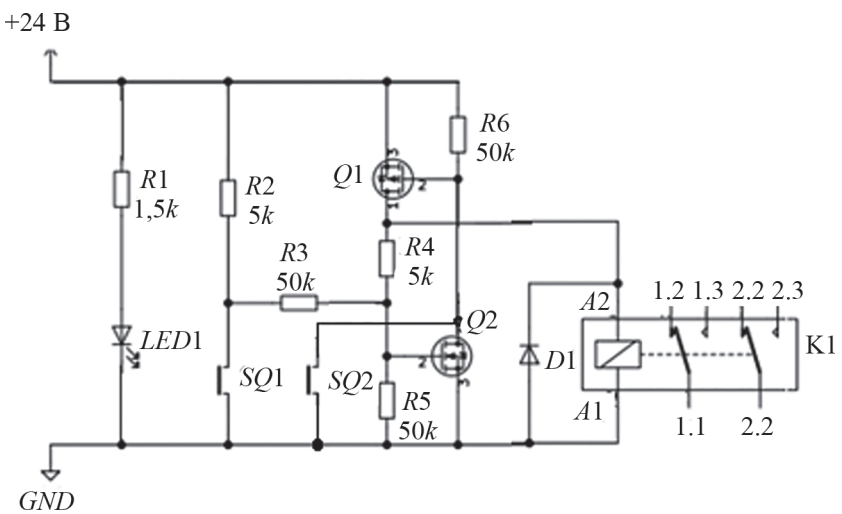


Рис. 2. Электрическая схема блока управления световой сигнализацией и блокировкой

Перечень электронных элементов блока управления световой сигнализацией и блокировкой

Обозначение на схеме рис. 2	Количество	Элемент
Q1	1	Транзистор IRFR3505PBF
Q2	1	Транзистор IRFI4024H-117P
SQ1, SQ2	2	Датчик вибрации ВД-1
LED1	1	Светодиод «Электрон 34»
D1	1	Диод 1N4003
R1	1	Резистор 1,5 кОм, CFR-25JT-52- 2R
R2, R4	2	Резистор 5 кОм, CFR-25JT-52- 2R
R3, R5, R6	3	Резистор 50 кОм, CFR-25JT-52- 2R
K1	1	Реле HF46F/024-HS1T

IV категории. Таким образом, при приближении поезда к переезду на расстояние до 2000 м светофоры включают для автотранспорта красный свет, при удалении поезда от переезда на расстояние 800 м красный свет выключается. Для машиниста поезда перед переездом включается жёлтый свет, после проезда переезда загорается зелёный свет, говорящий о конце ограничения скорости.

На рисунке 3 представлена разработанная и изготовленная экспериментальная действующая модель платы блока управления сигнализацией и блокировки.

Для постановки экспериментов изготовлен стенд для определения тока потребления блоком управления в различных режимах. Проведённые опыты показали уровень потребления тока блоком управления при срабатывании датчика вибрации и выключении реле автодорожного и железнодорожных светофоров — 37 мА (рис. 4).

На рисунке 5 изображена аппаратура для исследования тока потребления блоком управления при срабатывании датчика вибрации и включённом реле автодорожного и железнодорожных светофоров. Ток потребления составил 60 мА.

Рельсовый транспорт — источник вибрации. Она передается, видоизменяясь, через рельсовые пути на их опору и, далее, в грунт, являясь самостоятельным источником воздействия и порождая переизлучённый шум [10 — 12]. Разрывы рельсового пути в стыках рельсов провоцируют появление ударов [8]. Если рельсовый путь проложен по поверхности земли или по эстакаде, то вибрация передается через грунт в виде поверхностных волн [8, 9]. Уровень вибрации и переизлученный на датчик шум зависят от массы и скорости передвижения подвижного состава и наблюдаются в диапазоне 1...250 Гц с виброскоростью от 20 до 100 мм/с [11 — 13].

Для устойчивой работы системы сигнализации и блокировки необходим вибродатчик с характеристикой, соответствующей восприятию вибрации от проходящего состава, т. е. виброскоростью срабатывания менее 20 мм/с. Он должен быть закреплён на конструкциях линии, рельсах, шпалах или в непосредственной близости от железнодорожного пути.

Выполнен анализ имеющихся на российском рынке вибродатчиков. Сенсорные датчики SW-420, SW-18010P не соответствуют требованиям по параметру низкой температуры.

Электрохимический вибродатчик VTV122 имеет высокую стоимость (17943 руб.). Электрохимический вибродатчик ВД06А стоит 11020 руб.

Механические вибродатчики SW-200D, SW420 работают с напряжением не более +12 В.

По результатам анализа принято решение о создании электрохимического вибродатчика, способного работать в спроектированной системе сигнализации и блокировки.

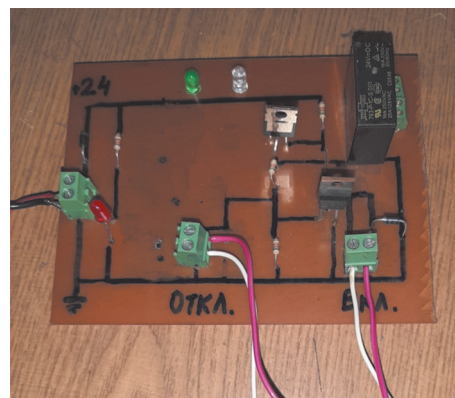


Рис. 3. Экспериментальная действующая модель платы блока управления сигнализацией и блокировки

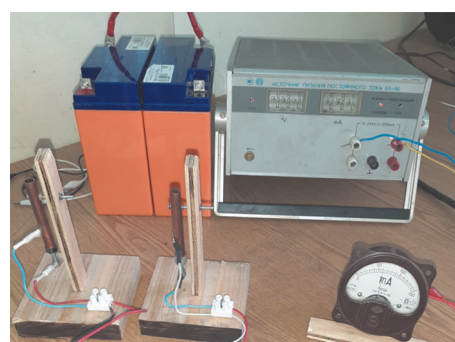


Рис. 4. Аппаратура для эксперимента по определению тока потребления при включённом автодорожном светофоре

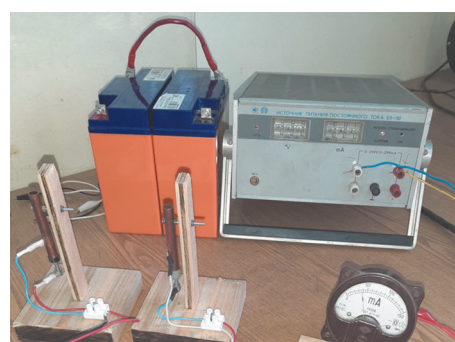


Рис. 5. Аппаратура для измерения тока потребления при включённом автодорожном и выключенных железнодорожных светофорах

Критерии датчика — работа на замыкание при виброскорости более 3,5 мм/с, ремонтпригодность и низкая себестоимость.

#### Характеристики изготовленного датчика вибрации ВД-1

Рабочее напряжение, В .....	24,0
Максимальный ток, мА .....	менее 5,0
Температура окружающей среды °С .....	от -30 до +100
Состояние .....	нормально разомкнут
Виброскорость срабатывания, более, мм/с .....	3,5
Размеры корпуса, мм .....	55,0×10,0

Принцип работы электрохимического датчика основан на замыкании свободного конца пружины на



корпус датчика. Внешний вид датчика вибрации ВД-1 представлен на рис. 6. Корпус изготовлен из медной трубки диаметром 10 мм, в одном конце установлен изолятор, в центре которого проходит стержень диаметром 4 мм. Внешний конец стержня является контактом для включения в цепь. В роли второго контакта выступает корпус вибродатчика. На внутреннем конце стержня закреплена подвижная пружина, которая под влиянием вибрации свободным концом замыкается на корпус вибродатчика. Свободный конец корпуса вибродатчика заглушён.

Чувствительность датчика регулируется вкручиванием пружины на стержень, которым является винт М4×30, т. е. уменьшением свободной длины пружины и увеличением её жёсткости.

На рисунке 7 изображены детали, из которых состоит электромеханический вибродатчик ВД-1.

Экспериментальные исследования по определению чувствительности вибродатчика по параметру виброскорости показали срабатывание датчика при 3,5 мм/с.

На рисунке 8 дан показатель минимальной виброскорости, при которой происходит уверенное срабатывание вибродатчика ВД-1. Эксперимент выполнен в программе «VibrationMeterSmartToolsver. 1.6 10».

График изменения вибрации от скорости и момент срабатывания вибродатчика ВД-1 продемонстрирован на рис. 9.

Для гарантированной работы вибродатчика принята виброскорость срабатывания 3,5 мм/с. Особенностью работы цепи ВД-1 является отсутствие электропотребления. Расход электроэнергии системой сигнализации происходит при замыкании транзисторов датчиком в течение 2 мс (можно пренебречь).

Изучение работы ВД-1, подключённого к электрической линии длиной 2000 м, показало его гарантированную работу. При замыкании датчика блок управления включает реле, обеспечивающее электроснабжение автодорожных и железнодорожных светофоров.

На железнодорожных линиях IV категории допускается скорость движения составов до 80 км/ч. Тормозной путь (в зависимости от массы поезда и уклона полотна) составляет до 1000 м [14].

Для повышения безопасности движения и информированности машиниста поезда на железнодорожной линии необходимо устанавливать светофоры: первый — предупреждающий о приближении к переезду, второй — после его проезда, снимающий скоростные ограничения.

Первый железнодорожный светофор устанавливается на расстоянии 1500...2000 м до переезда за первым датчиком движения, после прохождения которого система сигнализации и блокировки включает жёлтый железнодорожный светофор. Большая протяжённость электрической линии ЖС при напряжении + 24 В способствует увеличению омических потерь в линии, к которой подключен железнодорожный светофор.

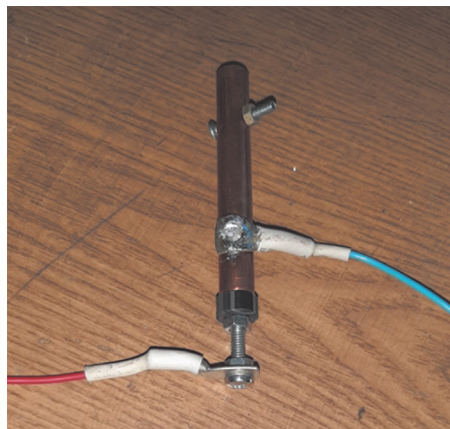


Рис. 6. Электромеханический вибродатчик ВД-1



Рис. 7. Конструкция вибродатчика ВД-1

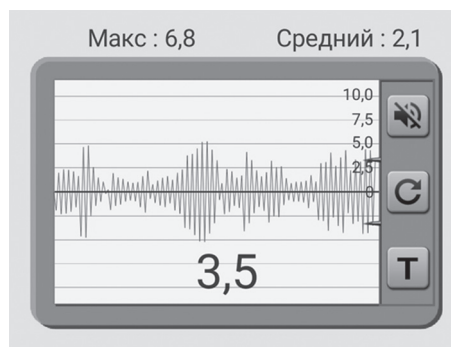


Рис. 8. Показания виброметра в момент срабатывания вибродатчика ВД-1

Расчётное падение напряжения в линии железнодорожного светофора с кабелем РК 75-12 равно:

$$U_{\text{каб}}^{\text{пад}} = U_{\text{ц.ж}}^{\text{пад}} + U_{\text{опл}}^{\text{пад}};$$

$$U_{\text{каб}}^{\text{пад}} = 8,0 + 2,4 = 10,4 \text{ В},$$

где  $U_{\text{ц.ж}}^{\text{пад}} = \frac{\rho l}{S} I_{\text{лампы}}$ ,  $U_{\text{ц.ж}}^{\text{пад}} = 40,22 \cdot 0,2 = 8,0 \text{ В}$ ;  $I_{\text{лампы}}$  — ток потребления лампы светофора,  $I_{\text{лампы}} = 0,2 \text{ А}$ .

Расчётное сопротивление центральной жилы, В:

$$R_{\text{ц.ж}} = (\rho l) / S;$$

$$R_{\text{ц.ж}} = (0,0175 \cdot 2000) / 0,87 = 40,22 \text{ Ом}.$$

где  $R_{\text{ц.ж}}$  — сопротивление центральной жилы, Ом;  $\rho$  — удельное сопротивление провода,  $\rho = 0,0175 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ ;

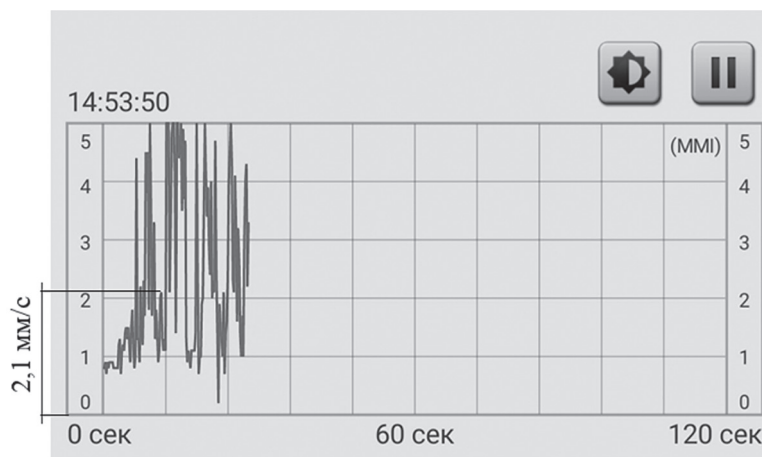


Рис. 9. График изменения вибрации от скорости (показан момент срабатывания вибродатчика ВД-1)

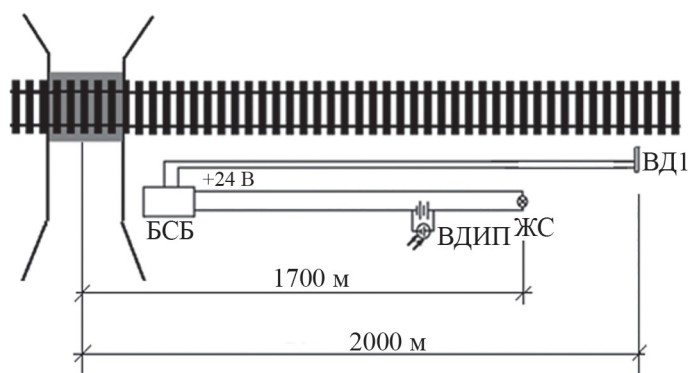


Рис. 10. Схема расположения датчика вибрации ВД-1 и предупреждающего ЖС на линии

$l$  — длина провода,  $l = 2000$  м;  $S$  — площадь поперечного сечения центральной жилы,  $S = 0,87$  мм<sup>2</sup>.

Расчётное сопротивление в оплётке:

$$R_{\text{опл}} = (\rho l) / S;$$

$$R_{\text{опл}} = 0,0175 \cdot 2000 / 2,84 = 12,3 \text{ Ом},$$

где  $R_{\text{опл}}$  — сопротивление оплётки, Ом;  $S$  — площадь поперечного сечения оплётки,  $S = 2,84$  мм<sup>2</sup>.

Расчётное падение напряжение в оплётке, В:

$$U_{\text{опл}}^{\text{пад}} = \frac{\rho l}{S} I;$$

$$U_{\text{опл}}^{\text{пад}} = 12,3 \cdot 0,2 = 2,4 \text{ В}.$$

На рисунке 10 представлен фрагмент схемы с первым датчиком вибрации ВД-1, вольтодобавочным источником питания и предупреждающим желтым сигналом светофора.

Разработан вольтодобавочный источник питания (ВДИП) линий большой протяжённости для электропитания железнодорожных светофоров, на работоспособность которых критически воздействует падение напряжения. На рисунке 11 дана электрическая

схема ВДИП, напряжение восстановления которой зависит от уровня падения напряжения. Основным условием работы линии стала соизмеримая мощность нагрузки линии и ВДИП.

ВДИП устанавливают в разрез линии связи с целью восстановления напряжения до расчётного уровня на ЖС. Расстояние от основного источника питания, на котором устанавливают ВДИП, определим следующим образом:

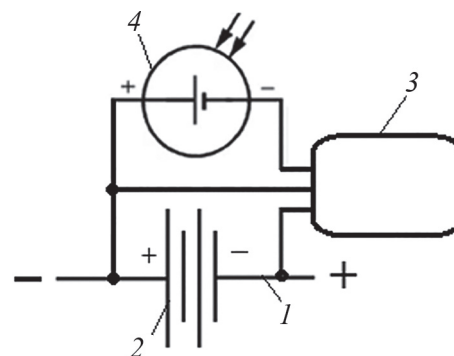


Рис. 11. Электрическая схема ВДИП:

1 — линия связи; 2 — вольтодобавочный источник питания; 3 — контроллер заряда; 4 — фотоэлектрический модуль

$$l = \frac{U_{\text{каб}}^{\text{пад}} S}{\rho l};$$

$$l = \frac{10,2 \cdot 0,87}{0,0175 \cdot 0,2} = 2535 \text{ м.}$$

### Заключение

Решением задачи электроснабжения отдельно стоящих местных, временных, технологических и стихийных переездов, расположенных в труднодоступных и удалённых от централизованных электросетей районах, может стать использование ВИЭ.

Различные средства безопасности и регулирования (шлагбаумы, заградители, наружное освещение, звуковая и световая сигнализация) могут быть использованы в разном составе в зависимости от мощности применяемых генерирующих устройств, их возможности бесперебойного обеспечения электроэнергией летом и зимой как в дневное, так и в ночное время.

Разработанная система электроснабжения световой сигнализации, обслуживающая пересечения автомобильных и малоинтенсивных железных дорог, где ско-

рость составов не превышает 80 км/час, вполне обеспечивает регулирование движение железнодорожного и автомобильного транспорта.

Разработан и исследован датчик вибрации, срабатывающий при виброскорости 3,5 мм/с для линии световой сигнализации и блокировки автотранспорта сельскохозяйственного назначения протяжённостью 2000 м на пересечениях с малоинтенсивными железнодорожными линиями, с вольтодобавочным источником питания напряжением 12 В от возобновляемых источников энергии.

Источником гарантированного электроснабжения должен быть выбран топливный электрогенератор постоянного тока с напряжением, соответствующим напряжению аккумуляторных батарей.

Обоснованы перспективы использования, разработана, изготовлена и испытана система электроснабжения, включающая бензогенератор, ВЭУ, СЭС и АБ, обеспечивающая эквивалентную нагрузку оборудования железнодорожного переезда с энергопотреблением 1752 кВт·ч в год и себестоимостью топлива — 4,28 руб.

### Литература

1. Cherian M.E., Das A., Sharma R. Integration of Renewable Energy Sources with LCC HVDC System Using a New Circuit Topology with DC Fault Ride-through Capability // IET Power Electronics. 2020. V. 13. No. 19. Pp. 4551—4561.
2. Hasanpour S., Siwakoti Y., Blaabjerg F. New Single-switch Quadratic Boost DC/DC Converter with Low Voltage Stress for Renewable Energy Applications // Ibid. Pp. 4592—4600.
3. Singh Y., Singh B., Mishra S. Photovoltaic-battery Powered Grid Connected System Using Multi-structural Adaptive Circular Noise Estimation Control // IET Power Electronics. 2021. V. 14. No. 2. Pp. 397—411.
4. Усачева И.В. и др. Микросети для локального энергоснабжения децентрализованных потребителей: обзор международного опыта // Научные труды Вольного экономического общества России. 2021. Т. 229. № 3. С. 167—184.
5. Гусарова Е.В. Повышение эффективности системы безопасности на железнодорожных переездах // Меридиан. 2020. № 8(42). С. 3—5.
6. Гусарова Е.В. Телевидение как элемент безопасности на железнодорожном транспорте // Экология и безопасность жизнедеятельности: Сб. статей XVIII Междунар. науч.-практ. конф. Пенза: Изд-во Пензенского гос. аграрного ун-та. 2018. С. 131—133.
7. Кнышев И.П., Гусарова Е.В., Тулемисов Т.Т. Система технического зрения на железнодорожном транспорте // Автоматика, связь, информатика. 2019. № 10. С. 15—17.

### References

1. Cherian M.E., Das A., Sharma R. Integration of Renewable Energy Sources with LCC HVDC System Using a New Circuit Topology with DC Fault Ride-through Capability. IET Power Electronics. 2020;13;19: 4551—4561.
2. Hasanpour S., Siwakoti Y., Blaabjerg F. New Single-switch Quadratic Boost DC/DC Converter with Low Voltage Stress for Renewable Energy Applications. Ibid:4592—4600.
3. Singh Y., Singh B., Mishra S. Photovoltaic-battery Powered Grid Connected System Using Multi-structural Adaptive Circular Noise Estimation Control. IET Power Electronics. 2021;14;2:397—411.
4. Usacheva I.V. i dr. Mikroseti dlya Lokal'nogo Energosnabzheniya Detsentralizovannykh Potrebiteley: Obzor Mezhdunarodnogo Opyta. Nauchnye Trudy Vol'nogo Ekonomicheskogo Obshchestva Rossii. 2021;229;3:167—184. (in Russian).
5. Gusarova E.V. Povyshenie Effektivnosti Sistemy Bezopasnosti na Zheleznodorozhnykh Pereezdakh. Meridian. 2020;8(42):3—5. (in Russian).
6. Gusarova E.V. Televidenie kak Element Bezopasnosti na Zheleznodorozhnom Transporte. Ekologiya i Bezopasnost' Zhiznedeyatel'nosti: Sb. Statey XVIII Mezhdunar. Nauch.-prakt. Konf. Penza: Izd-vo Penzenskogo Gos. Agrarnogo Un-ta. 2018:131—133. (in Russian).
7. Knyshev I.P., Gusarova E.V., Tulemisov T.T. Sistema Tekhnicheskogo Zreniya na Zheleznodorozhnom Transporte. Avtomatika, Svyaz', Informatika. 2019;10: 15—17. (in Russian).

8. Gueye I., Dioum I., Diop I., Wane K. Performance of Hybrid RF/FSO Cooperative Systems Based on Quasicyclic LDPC Codes and Space-coupled LDPC Codes // *Wireless Communications & Mobile Computing*. 2020. V. 12. Pp. 1—15.

9. Al-Saman A., Mohamed M., Cheffena M. Radio Propagation Measurements in the Indoor Stairwell Environment at 3.5 and 28 GHz for 5G Wireless Networks // *Intern. J. Antennas and Propagation*. 2020. V. 3. Pp. 1—10.

10. Li J., Wu H. Localisation Algorithm for Security Access Control in Railway Communications // *IET Intelligent Transport Syst.* 2021. V. 14(2). Pp. 2151—2159.

11. Tavana M., Ozger M., Baltaci A. Wireless Power Transfer for Aircraft IoT Applications: System Design and Measurements // *IEEE Internet of Things J.* 2021. V. 8. No. 15. Pp. 11834—11846.

12. Vodolazskaya I., Eserkepov A., Akhunzhonov R. Effect of Tunneling on the Electrical Conductivity of Nanowire-based Films: Computer Simulation within a Core-shell Model // *J. Appl. Phys.* 2019. V. 126. No. 24. P. 244903.

13. Mitsugi J., Sato Y., Kawakita Y. Frequency Efficient Subcarrier Spacing in Multicarrier Backscatter Sensors System // *IEICE Trans. Fundamentals of Electronics Communications and Computer Sci.* 2019. V. E102A. No. 12. Pp. 1834—1841.

14. Гусарова Е.В., Чеченя С.А. Влияние параметров фрактальных сигналов на характеристики скейлинговой системы передачи информации // *Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Тез. докл. XXIII Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов*. М.: Изд-во МЭИ, 2017. Т. 1. С. 28.

8. Gueye I., Dioum I., Diop I., Wane K. Performance of Hybrid RF/FSO Cooperative Systems Based on Quasicyclic LDPC Codes and Space-coupled LDPC Codes. *Wireless Communications & Mobile Computing*. 2020;12:1—15.

9. Al-Saman A., Mohamed M., Cheffena M. Radio Propagation Measurements in the Indoor Stairwell Environment at 3.5 and 28 GHz for 5G Wireless Networks. *Intern. J. Antennas and Propagation*. 2020;3:1—10.

10. Li J., Wu H. Localisation Algorithm for Security Access Control in Railway Communications. *IET Intelligent Transport Syst.* 2021;14(2):2151—2159.

11. Tavana M., Ozger M., Baltaci A. Wireless Power Transfer for Aircraft IoT Applications: System Design and Measurements. *IEEE Internet of Things J.* 2021;8;15:11834—11846.

12. Vodolazskaya I., Eserkepov A., Akhunzhonov R. Effect of Tunneling on the Electrical Conductivity of Nanowire-based Films: Computer Simulation within a Core-shell Model. *J. Appl. Phys.* 2019;126;24:244903.

13. Mitsugi J., Sato Y., Kawakita Y. Frequency Efficient Subcarrier Spacing in Multicarrier Backscatter Sensors System. *IEICE Trans. Fundamentals of Electronics Communications and Computer Sci.* 2019;E102A;12:1834—1841.

14. Gusarova E.V., Chechenya S.A. Vliyaniye Parametrov Fraktal'nykh Signalov na Kharakteristiki Skeylingovoy Sistemy Peredachi Informatsii. *Radioelektronika, Elektrotehnika i Energetika: Tez. Dokl. XXIII Mezhdunar. Nauch.-tekhn. Konf. Studentov i Aspirantov*. M.: Izd-vo MEI, 2017;1:28. (in Russian).

#### Сведения об авторах:

**Харченко Валерий Владимирович** — доктор технических наук, профессор, главный специалист Федерального научного агроинженерного центра ВИМ, e-mail: kharval@mail.ru

**Гусарова Елена Валентиновна** — старший преподаватель Российского университета транспорта, e-mail: gusarova\_elena93@list.ru

#### Information about authors:

**Kharchenko Valeriy V.** — Dr.Sci. (Techn.), Professor, Chief Expert of Federal Scientific Agroengineering Center VIM, e-mail: kharval@mail.ru

**Gusarova Elena V.** — Senior Lecturer Russian University of Transport, e-mail: gusarova\_elena93@list.ru

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

**Conflict of interests:** the authors declare no conflict of interest

**Статья поступила в редакцию:** 24.11.2022

**The article received to the editor:** 24.11.2022

**Статья принята к публикации:** 06.06.2023

**The article has been accepted for publication:** 06.06.2023