



Информация об авторах

Authors

Иванкова Людмила Николаевна – к. т. н., доцент кафедры «Управление транспортными процессами», Российский университет транспорта, г. Москва, e-mail: ivankovaln@yandex.ru

Буракова Анжелика Васильевна – старший преподаватель кафедры «Социально-гуманитарные, естественно-научные и общепрофессиональные дисциплины», филиал Ростовского государственного университета путей сообщения в г. Воронеж, г. Воронеж, e-mail: avburakova@mail.ru

Lyudmila Nikolaevna Ivankova – Ph.D. in Engineering Science, Assoc. Prof. at the Subdepartment of Transport Process Management, Russian Transport University, Moscow, e-mail: ivankovaln@yandex.ru

Anzhelika Vasil'evna Burakova – Asst. Prof. at the Subdepartment of Social Humanitarian, Natural Sciences and General Professional Disciplines, Branch of Rostov State Transport University in Voronezh, Voronezh, e-mail: avburakova@mail.ru

Для цитирования

For citation

Иванкова Л. Н. Определение пропускной способности станций с учетом емкости путевого развития / Л. Н. Иванкова, А. В. Буракова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. - 2018. - Т. 59, № 3. - С. 92–98. - DOI: 10.26731/1813-9108.2018.3(59).92-98.

Ivankova L. N., Burakova A. V. Determination of carrying capacity of stations taking into account the length of the railway tracks. *Modern technologies. System analysis. Modeling*, 2018, Vol. 59, No. 3, pp. 92–98. DOI: 10.26731/1813-9108.2018.3(59).92-98.

УДК 621.311

DOI: 10.26731/1813-9108.2018.3(59).98-107

В. П. Закарюкин¹, А. В. Крюков^{1,2}

¹ Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

² Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация

Дата поступления: 10 октября 2018

ТРЕХФАЗНО-ОДНОФАЗНЫЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ ШТЕЙНМЕЦА

Аннотация. В сельских электрических сетях иногда применяются трехфазно-однофазные линии электропередачи (ЛЭП), а для электроснабжения удаленных потребителей используются ЛЭП «провод – земля». Эффективность систем, построенных с использованием однофазных электропередач, может быть повышена с помощью трехфазно-однофазных преобразователей по прямой и обратной схеме Штейнмеца.

Схема Штейнмеца позволяет симметризовать однофазную, а также двухфазную нагрузки и осуществлять компенсацию реактивной мощности. С ее помощью можно обеспечить полное использование мощности трехфазного трансформатора. Проведенные расчеты показали невысокую чувствительность этой схемы к погрешностям регулирования параметров. Схема Штейнмеца может быть применена для получения симметричной трехфазной системы напряжений от однофазного источника.

Для внедрения ЛЭП с преобразователями Штейнмеца необходимо создание технологий компьютерного моделирования их режимов. Такие технологии созданы на основе методов и средств моделирования режимов электрических систем в фазных координатах, разработанных в ИРГУПС.

Результаты моделирования режимов систем электроснабжения с однофазными ЛЭП показывают, что при протяженности ЛЭП, превышающей 25 км, потери мощности в линии «провод – земля» становятся меньше, чем в двухпроводной линии. Если длина линии превышает 30 км, то система электроснабжения с ЛЭП «провод – земля» становится более эффективной по критерию отклонений напряжения. Коэффициент несимметрии по обратной последовательности на шинах 0,4 кВ приемной подстанции в обоих вариантах равен 0,2 %, а по нулевой последовательности близок к нулю.

Ключевые слова: однофазная линия электропередачи, однопроводная ЛЭП, схема Штейнмеца, моделирование.

V. P. Zakaryukin¹, A. V. Kryukov^{1,2}

¹ Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

² Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, the Russian Federation

Received: October 10, 2018

THREE-PHASE AND SINGLE-PHASE POWER SUPPLY SYSTEMS WITH STEINMETZ CONVERTERS

Abstract. In rural electrical networks three-phase and single-phase electrical power transmission lines are applied, and for electrical power supply of remote customers power lines (PL) "wire – earth" are used. The efficiency of systems constructed with use of single-phase transmissions can be increased by three-phase – single-phase Steinmetz circuit.



The Steinmetz circuit allows us to symmetrize single-phase and two-phase loadings and to implement reactive power compensation. With its help it is possible to provide complete use of three-phase transformer rated power. The carried out calculations showed low sensitivity of this scheme to errors of parameters' regulation. The Steinmetz circuit can be applied for obtaining the symmetric three-phase voltage system from a single-phase source.

To implement the Steinmetz circuit, it is necessary to create computer simulation of their modes. Such technologies were created on the basis of methods and means of electrical system mode simulation in phase coordinates developed in Irkutsk State Transport University.

Simulation results of electrical power supply system's modes with the single-phase power lines show that power losses in the "wire – earth" line become less than in the two-wire power line when power line extent exceeds 25 km. If a line length exceeds 30 km, then electric system with power line "wire – earth" becomes more effective by criterion of voltage deviations. The negative sequence asymmetry coefficient on 0,4 kV buses of receiving substation is equal to 0,2 % in both variants, and zero sequence is close to zero.

Keywords: single-phase power line, single-wire line, Steinmetz circuit, simulation.

Введение

В электрических сетях сельскохозяйственного назначения иногда применяются трехфазно-однофазные линии электропередачи [1–3]. Для электроснабжения удаленных потребителей используются однопроводные ЛЭП «провод – земля» (SWER) [4–8]. Эффективность систем с однофазными электропередачами (рис. 1) может быть существенно повышена применением трехфазно-однофазных преобразователей, выполненных по прямой и обратной схемам Штейнмеца [9–13].



Рис. 1. Конструктивное исполнение ЛЭП «провод – земля» [4]

Для внедрения схем с преобразователями Штейнмеца необходимо создание технологий компьютерного моделирования их режимов. Такие технологии созданы в ИрГУПСе [14–17] на основе методов и средств моделирования режимов электрических систем в фазных координатах.

Преобразователи по схеме Штейнмеца

Для симметрирования однофазной нагрузки используются устройства с регулируемыми индуктивными и емкостными элементами [5]. Такие устройства могут быть реализованы на основе схемы Штейнмеца (рис. 2), наиболее эффективной

для чисто активной нагрузки. Реактивные мощности реактора и батареи конденсаторов должны быть в $\sqrt{3}$ раз меньше мощности нагрузки.

Для симметричной системы напряжений питания

$$\dot{U}_A = Ue^{j0^\circ}, \dot{U}_B = \underline{a}^2 U, \dot{U}_C = \underline{a} U,$$

где $\underline{a} = e^{j120^\circ} = -0,5 + j\sqrt{3}/2$, анализ режимов схемы Штейнмеца может быть выполнен с помощью преобразования треугольника (рис. 2, а) в звезду (рис. 2, б). Сопротивления звезды определяются следующими выражениями:

$$\underline{Z}_A = \frac{-jX_C(R_H + jX_H)}{R_H + jX_H + jX_L - jX_C};$$

$$\underline{Z}_B = \frac{X_C X_L}{R_H + jX_H + jX_L - jX_C};$$

$$\underline{Z}_C = \frac{jX_L(R_H + jX_H)}{R_H + jX_H + jX_L - jX_C},$$

где $\underline{Z}_H = R_H + jX_H$ – сопротивление нагрузки.

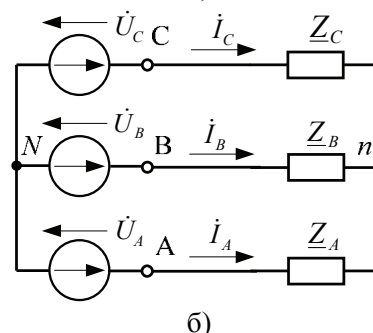
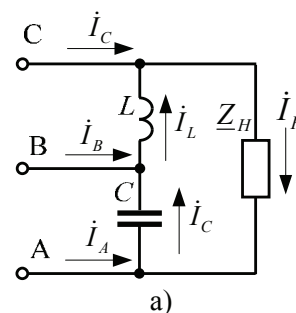


Рис. 2. Схема Штейнмеца (а) и эквивалентная звезда (б)



Для схемы рис. 2, б можно записать следующие уравнения по второму закону Кирхгофа:

$$\begin{aligned} & \dot{I}_A \frac{-jX_C(R_H + jX_H)}{R_H + jX_H + jX_L - jX_C} - \\ & - a^2 \dot{I}_A \frac{X_C X_L}{R_H + jX_H + jX_L - jX_C} = \\ & = U - a^2 U \\ & a \dot{I}_A \frac{X_C X_L}{R_H + jX_H + jX_L - jX_C} - \\ & - \dot{I}_A \frac{jX_L(R_H + jX_H)}{R_H + jX_H + jX_L - jX_C} = \\ & = aU - U \end{aligned}$$

Решение этих уравнений дает соотношения для параметров преобразователя

$$\begin{aligned} \frac{X_L}{R_H} &= \sqrt{3} \frac{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}{1 + \sqrt{3} \operatorname{tg} \varphi}, \quad \frac{X_C}{X_L} = \frac{1 + \sqrt{3} \operatorname{tg} \varphi}{1 - \sqrt{3} \operatorname{tg} \varphi}, \\ \operatorname{tg} \varphi &= \frac{X_H}{R_H}. \end{aligned}$$

При $R_H = X_H \sqrt{3}$ необходимость в емкостном элементе отпадает. Если выполняется условие $R_H < X_H \sqrt{3}$, то есть $\operatorname{tg} \varphi > 0,577$, то емкостный элемент необходимо заменить индуктивным (рис. 3).

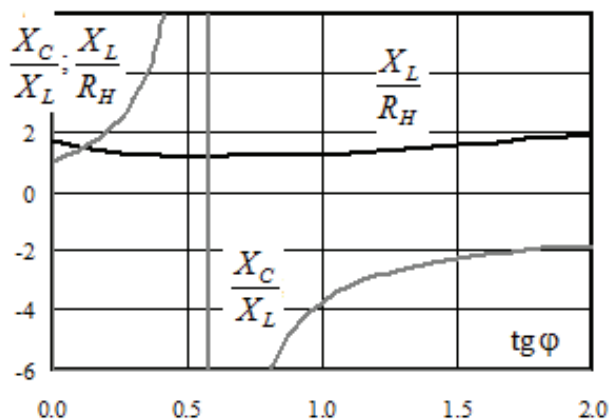


Рис. 3. Зависимости отношений сопротивлений от коэффициента реактивной мощности нагрузки

Выражения через мощности могут быть записаны как

$$\begin{aligned} R_H &= \frac{U_L^2}{P_H(1 + \operatorname{tg}^2 \varphi)}; \quad X_L = \frac{U_L^2}{Q_L}; \\ X_C &= \frac{U_L^2}{Q_C}; \\ \frac{Q_L}{P_H} &= \frac{1}{\sqrt{3}} + \operatorname{tg} \varphi; \quad \frac{Q_C}{Q_L} = \frac{1 - \sqrt{3} \operatorname{tg} \varphi}{1 + \sqrt{3} \operatorname{tg} \varphi}. \end{aligned}$$

Зависимости отношений мощностей от $\operatorname{tg} \varphi$ представлены на рис. 4.

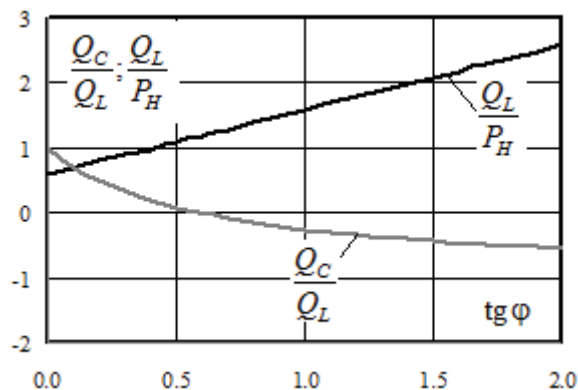


Рис. 4. Зависимости отношений мощностей от коэффициента реактивной мощности нагрузки

Схему Штейнмеца возможно использовать для симметрирования активно-индуктивной нагрузки. Однако при этом общий коэффициент мощности становится значительно меньше $\cos \varphi$ нагрузки:

$$\begin{aligned} Q_L &= P_H(0,577 + \operatorname{tg} \varphi); \\ Q_C &= P_H(0,577 - \operatorname{tg} \varphi); \quad Q_H = P_H \operatorname{tg} \varphi; \\ Q_\Sigma &= Q_L - Q_C + Q_H = 3P_H \operatorname{tg} \varphi; \\ \operatorname{tg} \varphi_\Sigma &= 3 \operatorname{tg} \varphi. \end{aligned}$$

Схема Штейнмеца позволяет симметрировать однофазную, а также двухфазную нагрузки и осуществлять компенсацию реактивной мощности. С ее помощью можно обеспечить полное использование мощности трехфазного трансформатора. Моделирование показало невысокую чувствительность этой схемы к погрешностям регулирования параметров.

Схема Штейнмеца может быть применена для получения симметричной трехфазной системы напряжений от однофазного источника. Анализ возможностей такого преобразования проведен для схемы рис. 5, а.

При анализе приняты следующие предположения:

- трансформатор считается идеальным, и его реактансы не учитываются;
- трехфазная нагрузка симметрична;
- получающаяся в результате преобразования система напряжений на нагрузке симметрична;
- нагрузка может быть активно-индуктивной, активно-емкостной или чисто активной;
- однофазное питающее напряжение синусоидально.

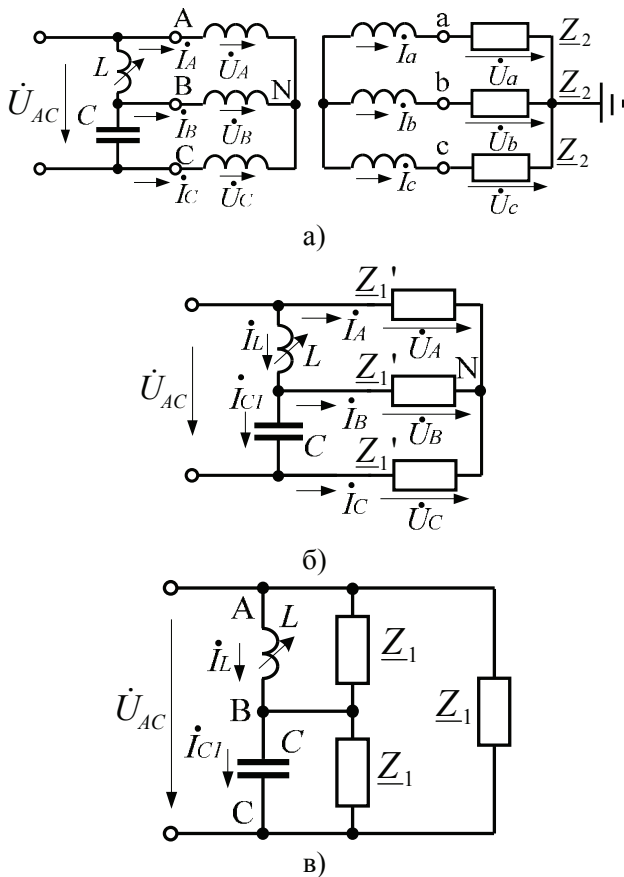


Рис. 5. Обращенная схема Штейнмеца: а) исходная схема; б) схема замещения; в) преобразованная схема замещения

При отсчетах углов напряжений относительно фазы АВ формулы для напряжений записываются следующим образом:

$$\dot{U}_{AB} = Ue^{j0^\circ}; \dot{U}_{BC} = \underline{a}^2 U; \dot{U}_{CA} = \underline{a} U; \dot{U}_{AC} = -\underline{a} U.$$

Пересчет сопротивления нагрузки $\underline{Z}_2 = R_2 + jX_2$ в первичную цепь трансформатора осуществляется через коэффициент трансформации k_T (рис. 5, б):

$$\underline{Z}_1' = k_T^2 \underline{Z}_2 = R_1' + jX_1'.$$

Звезду нагрузки удобнее преобразовать в треугольник (рис. 5, в):

$$\underline{Z}_1 = 3\underline{Z}_1' = R_1 + jX_1.$$

Две фазы треугольника образованы параллельным соединением элементов

$$\underline{Z}_{AB} = \frac{jX_L \underline{Z}_1}{jX_L + \underline{Z}_1}; \underline{Z}_{BC} = \frac{-jX_C \underline{Z}_1}{-jX_C + \underline{Z}_1}.$$

Токи фаз АВ и ВС определяются питающим напряжением и смещены относительно друг друга на угол 120° :

$$\dot{i}_{AB} = \dot{i}_{BC} = \frac{-\underline{a} U}{\underline{Z}_{AB} + \underline{Z}_{BC}}; \dot{i}_{AB} \underline{Z}_{AB} = \underline{a} \dot{i}_{BC} \underline{Z}_{BC},$$

откуда

$$\frac{jX_L}{jX_L + \underline{Z}_1} = (-0,5 + j\sqrt{3}/2) \frac{-jX_C}{-jX_C + \underline{Z}_1}.$$

Разделение вещественных и мнимых частей уравнения приводит к следующему решению:

$$\frac{X_L}{R_1} = \frac{b\sqrt{3} - (b-2)\text{tg}\varphi}{3b}; X_C = bX_L,$$

где $b = \frac{\sqrt{3} - \text{tg}\varphi}{\sqrt{3} + \text{tg}\varphi}$. Зависимости отношений сопротивлений от коэффициента реактивной мощности

$\text{tg}\varphi = X_1 / R_1$ приведены на рис. 6.

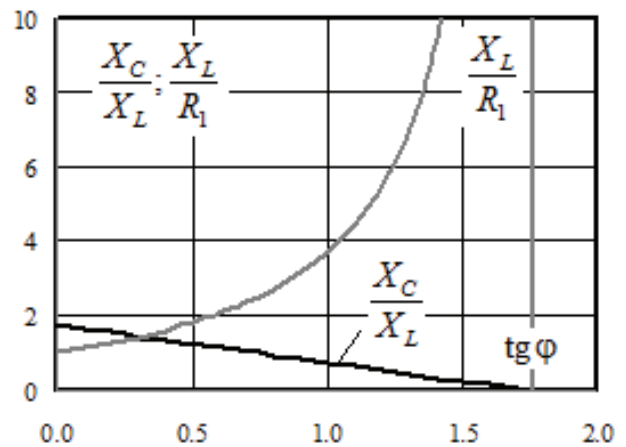


Рис. 6. Зависимости отношений сопротивлений от коэффициента реактивной мощности нагрузки

При $\text{tg}\varphi > \sqrt{3}$ вместо индуктивного элемента в обращенной схеме Штейнмеца требуется емкостный элемент. Это обстоятельство свидетельствует о резонансных свойствах схемы, что может приводить к усилению гармоник и возникновению перенапряжений.

Полученное решение может быть записано через мощности (рис. 7):

$$P_H = \frac{U^2}{R_1(1 + \text{tg}^2\varphi)}; Q_L = \frac{U^2}{X_L}; Q_C = \frac{U^2}{X_C};$$

$$\text{tg}\varphi = \frac{Q_H}{P_H};$$

$$\frac{Q_L}{P_H} = \frac{3b(1 + \text{tg}^2\varphi)}{b\sqrt{3} - (b-2)\text{tg}\varphi}; \frac{Q_C}{Q_L} = \frac{X_L}{X_C} = \frac{1}{b}.$$

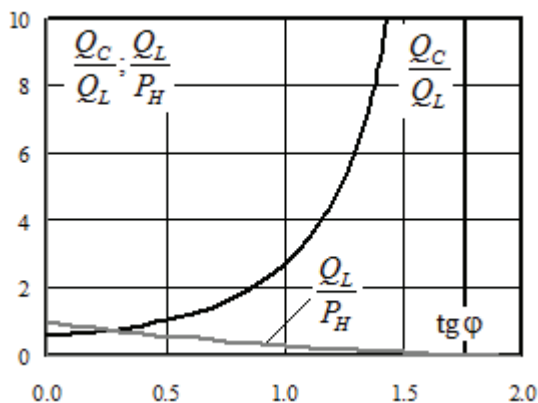


Рис. 7. Зависимости отношений мощностей от коэффициента реактивной мощности нагрузки

Проверка полученных соотношений проведена на схеме ПК Fazonord [15] по рис. 8.

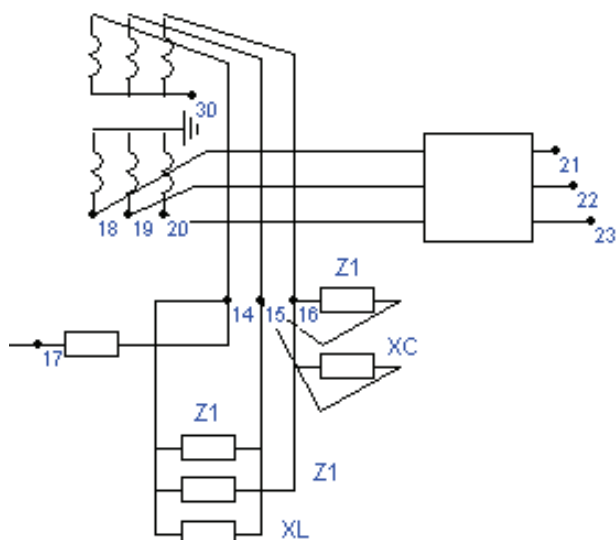


Рис. 8. Схема расчетной модели

Питающим центром схемы является узел 17, в узле 16 установлен шунт проводимостью 5 См. Три одинаковых нагрузки Z_1 сопротивлениями $300 + j300$ Ом подключены на первичной стороне трансформатора ТМ-250-27,5/6, который служит для контроля полученного трехфазного напряжения.

Индуктивное сопротивление симметрирующего элемента $X_L = 819$ Ом, емкостное сопротивление элемента X_C равно 221 Ом. Параметры режима схемы при отсутствии нагрузок на стороне 6 кВ представлены в табл. 2. Линейное напряжение на вторичной стороне трансформатора составило 6,16 кВ при коэффициенте несимметрии по обратной последовательности 0,6 %.

Таблица 2

Режимные параметры обращенной схемы Штейнмеца

Параметр	Номер узла			
	17	18	19	20
U , град.	-68,4	-38,4	-157,8	81,9
U , кВ	24,6	3,54	3,55	3,57
I , град.	-86,8	-	-	-
I , А	128,8	-	-	-

Питание трехфазной нагрузки по однофазной линии

С использованием прямой и обращенной схемы Штейнмеца возможно питание симметричной трехфазной нагрузки через двухпроводную линию (рис. 9).

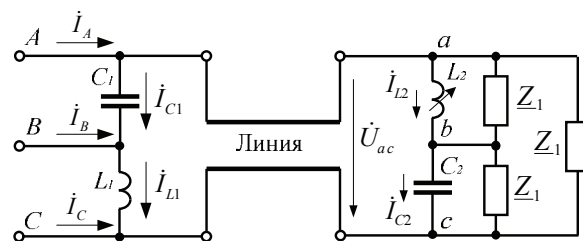


Рис. 9. Схема питания через двухпроводную линию

Параметры элементов правой части схемы должны отвечать соотношениям для обращенной схемы Штейнмеца:

$$\frac{X_{L2}}{R_1} = \frac{b\sqrt{3} - (b-2)\text{tg}\varphi}{3b},$$

$$X_{C2} = bX_{L2}; \quad b = \frac{\sqrt{3} - \text{tg}\varphi}{\sqrt{3} + \text{tg}\varphi}; \quad \text{tg}\varphi = \frac{X_1}{R_1}.$$

Сопротивление однофазной нагрузки прямой схемы Штейнмеца равно

$$\underline{Z}_H = R_H + jX_H = \underline{Z}_{ЛЭП} + \underline{Z}_O,$$

где $\underline{Z}_{ЛЭП}$ – сопротивление линии; $\underline{Z}_O = \frac{\underline{Z}_{CA}\underline{Z}_1}{\underline{Z}_{CA} + \underline{Z}_1}$ – входное сопротивление обращенной схемы Штейнмеца с нагрузкой $\underline{Z}_1 = R_1 + jX_1$.

При сравнительно низких напряжениях и малой длине ЛЭП можно пренебречь емкостной генерацией линии и внутренним индуктивным сопротивлением проводов. Тогда для сопротивления двухпроводной линии можно записать:

$$\underline{Z}_{ЛЭП} = \left(R_0 + j \frac{\omega}{\pi} \mu_0 \ln \frac{D}{r} \right) l,$$

где R_0 – активное сопротивление 1 км петли проводов; ω – круговая частота; D – расстояние между осями проводов; r – радиус проводов; l –

длина линии.

Входное сопротивление обращенной схемы Штейнмеца без нагрузки равно

$$\underline{Z}_{CA} = \frac{jX_{L2}\underline{Z}_1}{\underline{Z}_1 + jX_{L2}} + \frac{-jX_{C2}\underline{Z}_1}{\underline{Z}_1 - jX_{C2}} = R_{CA} + jX_{CA};$$

$$R_{CA} = \frac{R_1 X_{L2} (X_1 + X_{L2}) - R_1 X_1 X_{L2}}{R_1^2 + (X_1 + X_{L2})^2} -$$

$$\frac{R_1 X_{C2} (X_1 - X_{C2}) - R_1 X_1 X_{C2}}{R_1^2 + (X_1 - X_{C2})^2}$$

$$X_{CA} = \frac{X_1 X_{L2} (X_1 + X_{L2}) + R_1^2 X_{L2}}{R_1^2 + (X_1 + X_{L2})^2} -$$

$$\frac{X_1 X_{C2} (X_1 - X_{C2}) + R_1^2 X_{C2}}{R_1^2 + (X_1 - X_{C2})^2}$$

Тогда

$$\frac{X_{L1}}{R_H} = \sqrt{3} \frac{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_H}{1 + \sqrt{3} \operatorname{tg} \varphi_H};$$

$$\frac{X_{C1}}{X_{L1}} = \frac{1 + \sqrt{3} \operatorname{tg} \varphi_H}{1 - \sqrt{3} \operatorname{tg} \varphi_H}; \operatorname{tg} \varphi_H = \frac{X_H}{R_H}.$$

Анализируемая схема характеризуется следующими особенностями: требуется регулирование элементов при изменении нагрузки; при передаче значительной мощности будут наблюдаться заметные потери напряжения и энергии; возможны резонансные усиления высших гармоник.

Для проверки приведенных соотношений проведено моделирование режимов для схем, показанных на рис. 10.

Моделирование осуществлялось комплексом программ Fazonord [15]. Схемы расчетных моделей систем электроснабжения (СЭС) приведены на рис. 11. На рис. 12 представлены координаты расположения проводов в пространстве. Векторные диаграммы, иллюстрирующие режимы работы схем, представлены на рис. 13, 14. Результаты моделирования режимов сведены в табл. 3–6 и проиллюстрированы на рис. 15, 16.

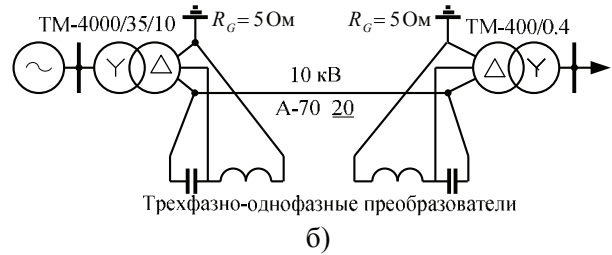
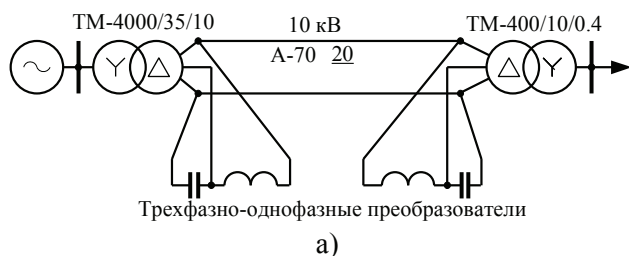


Рис. 10. Схемы СЭС: а) СЭС с двухпроводной ЛЭП; б) СЭС с ЛЭП «провод – земля»: R_G – сопротивление заземляющего устройства (ЗУ)

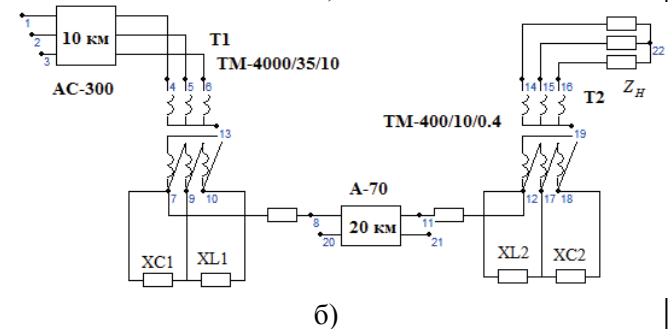
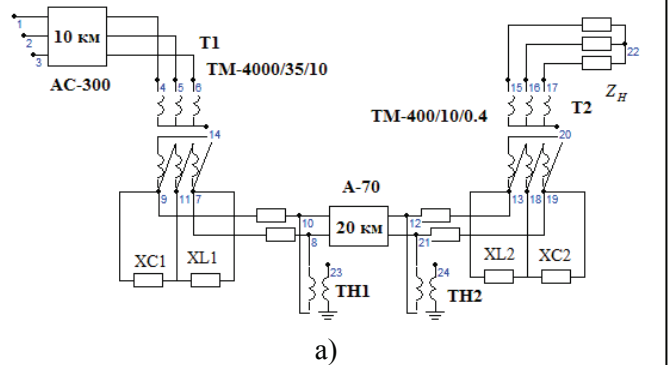
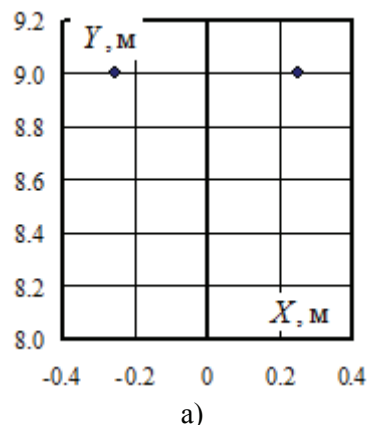


Рис. 11. Схемы расчетных моделей: а) СЭС с двухпроводной ЛЭП; б) СЭС с ЛЭП «провод – земля» (SWER)



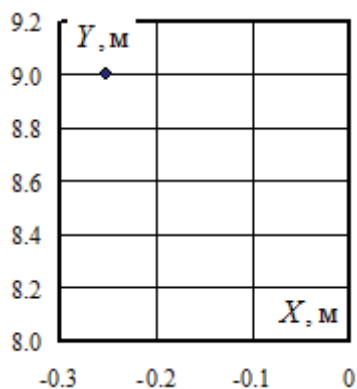
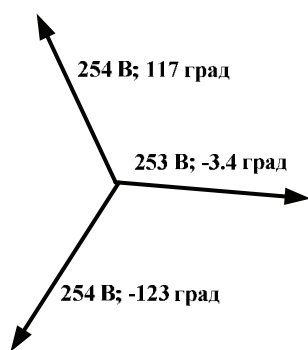
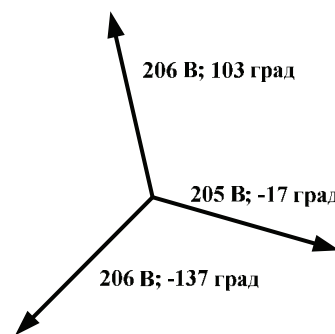


Рис. 12. Координаты проводов:
а) двухпроводная ЛЭП;
б) ЛЭП «провод – земля»



а)



б)

Рис. 13. Векторные диаграммы напряжений на шинах 0,4 кВ:
а) СЭС с двухпроводной ЛЭП; б) СЭС с ЛЭП «провод – земля»

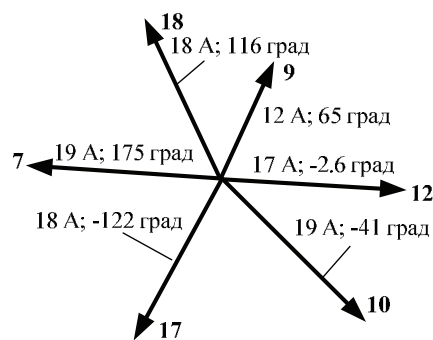


Рис. 14. Векторные диаграммы токов на выводах 10 кВ трансформаторов: жирным шрифтом выделены номера узлов

Таблица 3

Параметры режима ЛЭП

Узлы	СЭС с двухпроводной ЛЭП				Узлы	СЭС с ЛЭП «провод – земля»			
	U, кВ	U, град.	I, А	I, град.		U, кВ	U, град.	I, А	I, град.
10	6,21	-0,36	26,79	-11,88	8	12,29	-0,23	26,61	-12,12
8	6,21	179,64	26,79	168,12	20	5,40	0,24	0,00	-35,38
12	5,96	-1,41	26,89	167,14	11	11,96	-1,89	26,71	166,78
21	5,96	178,60	26,89	-12,86	21	5,32	-2,35	0,00	179,20

Таблица 4

Параметры режима трансформатора Т2

Узлы	СЭС с двухпроводной ЛЭП				Узлы	СЭС с ЛЭП «провод – земля»			
	U, кВ	U, град.	I, А	I, град.		U, кВ	U, град.	I, А	I, град.
15	0,25	-3,39	452,71	150,05	14	0,25	-3,75	449,75	149,69
16	0,25	-123,3	454,05	30,15	15	0,25	-123,64	451,08	29,79
17	0,25	116,52	454,09	-90,05	16	0,25	116,16	451,12	-90,40
13	5,95	-1,41	17,51	-2,24	12	11,96	-1,89	17,39	-2,60
18	10,35	-91,37	17,80	-121,78	17	11,96	-61,36	17,69	-122,14
19	5,95	178,60	17,78	117,16	18	0,13	-13,22	17,66	116,80
20	0,00	-99,38	0,00	-81,53	19	0,00	-127,77	0,00	174,06



Таблица 5

Потери в трансформаторах

Тип трансформатора	СЭС с двухпроводной ЛЭП				СЭС с ЛЭП «провод – земля»			
	ΔP_k , кВт	ΔQ_k , квар	ΔP_x , кВт	ΔQ_x , квар	ΔP_k , кВт	ΔQ_k , квар	ΔP_x , кВт	ΔQ_x , квар
ТМ-4000	9,64	57,39	9,44	55,58	9,63	57,36	9,44	55,58
ТМ-400	5,15	33,43	1,64	16,91	5,09	33,00	1,62	16,69
Итого:	14,79	90,82	11,08	72,49	14,72	90,36	11,06	72,27

Таблица 6

Потери в ЛЭП

СЭС	Потери в проводах		Потери в ЗУ, кВт	Суммарные потери	
	кВт	квар		кВт	квар
С двухпроводной ЛЭП	12,36	2,90	–	12,36	2,90
С ЛЭП «провод – земля»	6,78	4,65	7,1	13,88	4,65

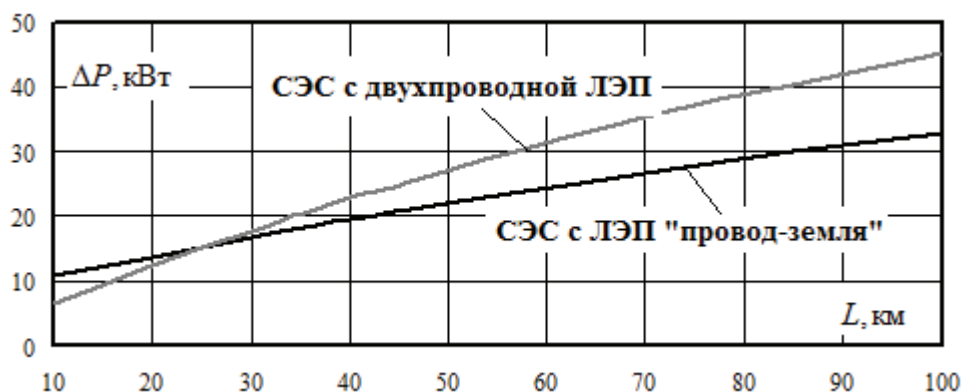


Рис. 15. Зависимость потерь от протяженности ЛЭП

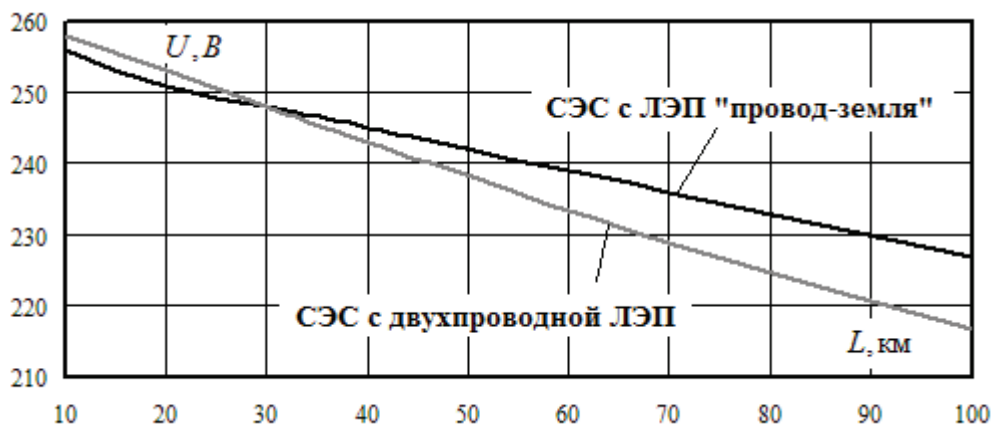


Рис. 16. Зависимость минимального уровня напряжения на шинах 0,4 кВ от протяженности ЛЭП

Результаты моделирования позволяют сформулировать следующие выводы.

1. При протяженности ЛЭП, превышающей 25 км, потери мощности в линии «провод – земля» становятся меньше, чем в двухпроводной ЛЭП.

2. При длине линии, большей 30 км, СЭС с ЛЭП «провод – земля» становится более эффективной по критерию отклонений напряжения.

3. Коэффициент несимметрии по обратной последовательности на шинах 0,4 кВ приемной

подстанции в обоих вариантах СЭС равен 0,2 %, а по нулевой последовательности близок к нулю.

Заключение

Предложена технология моделирования трехфазно-однофазных систем электроснабжения, реализованных на основе прямой и обратной схем Штейнмеца. Результаты моделирования показали, что применение этих схем обеспечивает эффективное преобразование трехфазных напряжений в однофазные и обратно.



БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Имшенецкий В.Н., Рожавский С.М. Сельские электрические сети. М.: Колос, 1970. 392 с.
2. Лещинская Т.Б., Наумов И.В. Электроснабжение сельского хозяйства. М.: БИБКОМ, ТРАНСЛОГ, 2015. 656 с.
3. Печенкин В.Е. Электроснабжение лесозаготовок по однопроводной системе ОПЗ. М.: Энергоатомиздат, 1965. 180 с.
4. Wolfs P.J. Capacity improvements for rural single wire earth return systems // In Proc. Power Engineering Conference IPEC 2005. 2005. P. 1–8.
5. Nasser Hosseinzadeh N., Mastakov S. Load Modelling for Medium Voltage SWER. 2008 Australasian Universities Power Engineering Conference, AUPEC 2008. Sydney, NSW, Australia.
6. Distribution Networks // 2008 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC'08). 2008. P. 1–6.
7. Analysis and field tests of the influence of harmonic components for protection relay currents on single-wire earth return systems / Eloi J. Rufato, C.C.B. de Oliveira, J.S. Omori, E.C. Senger // 19th International Conference on Electricity Distribution. Vienna. 2001. P. 1–4.
8. The use of single wire earth return (swer) as a potential solution to reduce the cost of rural electrification in Uganda / I.P. Da Silva, P. Mugisha, P. Simonis, G.R. Turyahikayo // Domestic Use of Energy Conference. 2001. P. 77–81.
9. Шидловский А.К., Кузнецов В.Г. Повышение качества энергии в электрических сетях. Киев: Наукова думка, 1985. 268 с.
10. Luis Sainz, Eduardo Caro and Sara Riera (2011). Characterization of Harmonic Resonances in the Presence of the Steinmetz Circuit in Power Systems, Power Quality Harmonics Analysis and Real Measurements Data, Prof. Gregorio Romero (Ed.), ISBN: 978-953-307-335-4, InTech, Available from: <http://www.intechopen.com/books/power-quality-harmonics-analysis-and-real-measurementsdata/characterization-of-harmonic-resonances-in-the-presence-of-the-steinmetz-circuit-in-power-systems>
11. Chindris M., Cziker A., Stefanescu A.S., Sainz L. (2002). Fuzzy logic controller for Steinmetz circuitry with variable reactive elements. Proceedings of 8th International Conference OPTIM 2002, Proc. 1G.3, pp. 233–238, 2002.
12. Jordi O., Sainz L., Chindris M. (2002). Steinmetz system design under unbalanced conditions. European Transactions on Electrical Power, Vol. 12, No. 4, July/August 2002, pp. 283–290.
13. Qingzhu W., Mingli W., Jianye C., Guipping Z. (2010). Model for optimal balancing single-phase traction load based on the Steinmetz's method. Proceedings of the IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), pp. 1565–1569, 2010.
14. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложно-несимметричные режимы электрических систем. Иркутск: Изд-во Иркут. унта. 2005. 273 с.
15. Крюков А.В., Закарюкин В.П. Методы совместного моделирования систем тягового и внешнего электроснабжения железных дорог переменного тока. Иркутск: ИрГУПС, 2011. 170 с.
16. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Determination of the induced voltages when nonparallel power lines are adjacent to one another // Power Technology and Engineering. 2015. Vol. 49. No. 4. P. 304–309.
17. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Multifunctional Mathematical Models of Railway Electric Systems // Innovation & Sustainability of Modern Railway – Proceedings of ISMR'2008. Beijing: China Railway Publishing House, 2008. P. 504–508.

REFERENCES

1. Imshenetskiy V.N., Rozhavskii S.M. Sel'skie elektricheskie seti [Rural electrical networks]. Moscow: Kolos Publ., 1970, 392 p.
2. Leshchinskaya T.B., Naumov I.V. Elektrosnabzhenie sel'skogo khozyaistva [Power supply of agriculture]. Moscow: BIBKOM, TRANSLOG Publ., 2015, 656 p.
3. Pechenkin V.E. Elektrosnabzhenie lesozagotovok po odnoprovodnoi sisteme OPZ [Power supply of logging through a single-wire system "single wire-earth"]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1965, 180 p.
4. Wolfs P.J. Capacity improvements for rural single wire earth return systems. In Proc. Power Engineering Conference IPEC 2005. 2005, pp. 1–8.
5. Nasser Hosseinzadeh N., Mastakov S. Load Modelling for Medium Voltage SWER. 2008 Australasian Universities Power Engineering Conference, AUPEC 2008. Sydney, NSW, Australia.
6. Distribution Networks. 2008 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC'08). 2008, pp. 1–6.
7. Rufato E.J., de Oliveira C.C.B., Omori J.S., Senger E.C. Analysis and field tests of the influence of harmonic components for protection relay currents on single-wire earth return systems. 19th International Conference on Electricity Distribution. Vienna, 2001, pp. 1–4.
8. Da Silva I.P., Mugisha P., Simonis P., Turyahikayo G. R. The use of single wire earth return (swer) as a potential solution to reduce the cost of rural electrification in Uganda. Domestic Use of Energy Conference, 2001, pp. 77–81.
9. Shidlovskii A.K., Kuznetsov V.G. Povyshenie kachestva energii v elektricheskikh setyakh [Improving the quality of energy in the electrical networks]. Kiev: Naukova dumka Publ., 1985, 268 p.
10. Sainz L., Caro E. and Riera S. Characterization of Harmonic Resonances in the Presence of the Steinmetz Circuit in Power Systems, Power Quality Harmonics Analysis and Real Measurements Data, Prof. Gregorio Romero (Ed.), 2011. ISBN: 978-953-307-335-4, InTech. Available from: <http://www.intechopen.com/books/power-quality-harmonics-analysis-and-real-measurementsdata/characterization-of-harmonic-resonances-in-the-presence-of-the-steinmetz-circuit-in-power-systems>
11. Chindris M., Cziker A., Stefanescu A.S. & Sainz L. Fuzzy logic controller for Steinmetz circuitry with variable reactive elements. Proceedings of 8th International Conference OPTIM 2002, Proc. 1G.3, 2002, pp. 233–238.
12. Jordi O., Sainz L. & Chindris M. Steinmetz system design under unbalanced conditions. European Transactions on Electrical Power, Vol. 12, No. 4, July/August 2002, pp. 283–290.
13. Qingzhu W., Mingli W., Jianye C. & Guipping Z. (2010). Model for optimal balancing single-phase traction load based on the Steinmetz's method. Proceedings of the IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), pp. 1565–1569, 2010.



14. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Slozhno-nesimmetrichnye rezhimy elektricheskikh system [Complex asymmetric modes of electrical systems]. Irkutsk: Irkut. un-ty Publ., 2005, 273 p.
15. Kryukov A.V., Zakaryukin V.P. Metody sovmestnogo modelirovaniya sistem tyagovogo i vneshnego elektrosnabzheniya zheleznikh dorog peremennogo toka [Methods for joint modeling of traction and external power supply systems for AC railways]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2011, 170 p.
16. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Determination of the induced voltages when nonparallel power lines are adjacent to one another. *Power Technology and Engineering*, 2015, Vol. 49, No. 4, pp. 304–309.
17. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Multifunctional Mathematical Models of Railway Electric Systems. *Innovation & Sustainability of Modern Railway – Proceedings of ISMR'2008*. Beijing: China Railway Publishing House, 2008, pp. 504–508.

Информация об авторах

Authors

Закарюкин Василий Пантелеймонович – д. т. н., профессор, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: zakar49@mail.ru

Крюков Андрей Васильевич – д. т. н., профессор, Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, e-mail: and_kryukov@mail.ru

Zakaryukin Vasilii Panteleimonovich – Doctor of Engineering Science, Prof., Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: zakar49@mail.ru

Kryukov Andrei Vasil'evich – Doctor of Engineering Science, Prof., Irkutsk State Transport University, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, e-mail: and_kryukov@mail.ru

Для цитирования

For citation

Закарюкин В. П. Трехфазно-однофазные системы электропитания с преобразователями Штейнмеца / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2018. – Т. 59, № 3. – С. 98–107. – DOI: 10.26731/1813-9108.2018.3(59).98-107.

Zakaryukin V. P., Kryukov A. V. Three-phase and single-phase power supply systems with Steinmetz converters. *Modern technologies. System analysis. Modeling*, 2018, Vol. 59, No. 3, pp. 98–107. DOI: 10.26731/1813-9108.2018.3(59).98-107.

УДК 656.211.5

DOI: 10.26731/1813-9108.2018.3(59).107-116

И. А. Чубарова, А. В. Дудакова

Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация
 Дата поступления: 20 сентября 2018

РАЗВИТИЕ ИНФРАСТРУКТУРЫ ПРИГОРОДНЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПЕРЕВОЗОК ИРКУТСКОЙ ОБЛАСТИ

Аннотация. Для улучшения качества обслуживания пригородных пассажиров Иркутской области разработан типовой проект пригородного павильона модульного и сборно-разборного типов. Проведен анализ вокзалов IV класса и пригородных павильонов. Анализ показал, что на данный момент в Иркутской области 35 вокзалов и 12 пригородных павильонов. Большинство из существующих павильонов нуждаются в частичной или полной реконструкции. Приведены требования к проектированию пригородных павильонов.

С учетом вместимости пригородного павильона (100 человек) разработана план-схема помещений. На основании рассчитанной площади разработан проект пригородного павильона модульного и сборно-разборного типов. Для монтажа пригородного павильона модульного типа необходимо 5 блок-контейнеров размерами 6×2,5×3 м. Для монтажа пригородного павильона сборно-разборного типа необходимо 35 сэндвич-панелей для стен (3×1,15 м), 9 сэндвич-панелей для пола (7,21×1,15 м), 9 сэндвич-панелей для потолка (7,21×1,15 м) и 9 сэндвич-панелей для кровли (7,21×1,15 м).

Для выбора оптимального варианта произведен расчет стоимости проекта павильона двух типов. На основании расчета был сделан вывод, что минимальную стоимость имеет проект пригородного павильона сборно-разборного типа.

Ключевые слова: пригородный павильон, вокзалы IV класса, требования к проектированию, план-схема, разработка проекта, павильон модульного типа, павильон сборно-разборного типа, сэндвич-панели, выбор варианта.

I. A. Chubarova, A. V. Dudakova

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation
 Received: September 20, 2018

DEVELOPMENT OF SUBURBAN RAILWAY TRANSPORT INFRASTRUCTURE IN IRKUTSK REGION

Abstract. To improve the quality of servicing the suburban passengers of Irkutsk Region, a standard project of a suburban pavilion of modular and demountable types has been developed. The analysis of class IV railway stations and suburban pavilions was carried