

УДК 621.332:621.3.012.8

EDN HNIOEJ

ФОРМИРОВАНИЕ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ

Л.А. Герман

e-mail: lagerman@mail.ru

Нижегородский Институт Путей Сообщения –
филиал Приволжского Государственного Университета Путей Сообщения
Нижний Новгород, Россия

К.С. Субханвердиев

e-mail: kamilsub@mail.ru

Российский Университет Транспорта
Москва, Россия

И.П. Карпов

ORCID: [0000-0001-9520-7546](https://orcid.org/0000-0001-9520-7546) e-mail: ivankapovrzd@yandex.ru

Трансэнерго – филиал ОАО «РЖД». Горьковская дирекция по энергообеспечению
Нижний Новгород, Россия

Предложена новая схема замещения системы внешнего электроснабжения (СВЭ) тяговой сети железных дорог, в которой совместно рассматриваются система тягового и внешнего электроснабжения с использованием существующей схемы замещения тяговой сети. Главная особенность – СВЭ представлена в виде треугольника (звезды) сопротивлений высоковольтных линий, питающих смежные тяговые подстанции. Расчет параметров новой схемы замещения связан с повышенным объемом вычислений, поэтому в работе предложены упрощенные алгоритмы расчетов. Используемые алгоритмы основаны на свойствах представленной схемы СВЭ, а сопротивление взаимной связи питающих линий двух смежных тяговых подстанций определяются по сопротивлениям короткого замыкания, переданных диспетчером энергосистемы. Погрешность расчетов по упрощенным алгоритмам не превышает нескольких процентов, что подтверждает эффективность алгоритма расчета упрощенной схемы замещения. Предлагаемый алгоритм позволяет выполнить экспресс-расчеты сопротивлений СВЭ, предварительно оценить параметры системы тягового электроснабжения при проектных расчетах.

Ключевые слова: внешнее электроснабжение, погрешность расчета, схема замещения, сопротивление линий, схема звезды, схема треугольника, тяговая сеть, упрощенный алгоритм, экспресс-расчеты.

Для цитирования: Герман Л.А., Субханвердиев К.С., Карпов И.П. Формирование схемы замещения системы электроснабжения тяговых подстанций // Интеллектуальная Электротехника. 2025. № 1. С. 36-39. EDN HNIOEJ

FORMATION OF EQUIVALENT CIRCUIT FOR POWER SUPPLY SYSTEM OF TRACTION SUBSTATIONS

L.A. German

e-mail: lagerman@mail.ru

Nizhny Novgorod Transport Institute – Volga State Transport University Branch
Nizhny Novgorod, Russia

K.S. Subkhanverdiev

e-mail: kamilsub@mail.ru

Russian University of Transport
Moscow, Russia

I.P. Karpov

ORCID: **0000-0001-9520-7546** e-mail: ivankapovrzd@yandex.ru

Transenergo – Branch of JSC «Russian Railways». Gorky Directorate for Energy Supply
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The paper proposed a new equivalent circuit for the external power supply system (EPSS) of the railway traction network where traction and external power supply systems are jointly considered using the existing equivalent circuit for the traction network. The main feature is that the EPSS is presented as a triangle (star) of resistances of high-voltage lines feeding adjacent traction substations. Calculation of the parameters of the new equivalent circuit is associated with an increased number of calculations, and simplified calculation algorithms are proposed. These algorithms are based on the properties of the proposed EPSS circuit, and the resistance of the mutual connection of the feeder lines of two adjacent traction substations is determined by the short-circuit resistances transmitted by the power system dispatcher. The calculation error does not exceed several percent using simplified algorithms, which confirms its efficiency. The proposed algorithm allows to perform express calculations of the EPSS resistances and to preliminarily evaluate the parameters of the traction power supply system during design calculations.

Keywords: external power supply, calculation error, equivalent circuit, line resistance, star circuit, delta circuit, traction network, simplified algorithm, express calculations.

For citation: L.A. German, K.S. Subkhanverdiev and I.P. Karpov, “Formation of equivalent circuit for power supply system of traction substations”, *Smart Electrical Engineering*, no. 1, pp. 36-49, 2025. EDN HNI0EJ

I. Введение

В [1-3] разработана новая схема замещения системы внешнего электроснабжения (СВЭ) тяговых подстанций (ТП), позволяющая уточнить расчеты тяговых сетей. Задача статьи состоит в формировании полной схемы

замещения систем тягового электроснабжения совместно с СВЭ. Кроме того, в зависимости от задачи расчета, параметры схемы замещения предлагается рассчитывать по полному или упрощенному алгоритму. Тем самым авторы продолжают поиск новых рациональных решений, призванных автоматизировать процессы функционирования и технического обслуживания электротехнического комплекса тягового электроснабжения [3].

Впервые в [1, 4] указана методическая погрешность нормативного метода расчета сопротивлений СВЭ ТП, заключающаяся в том, что в нормативных документах [5, 6] принята ошибочная схема замещения СВЭ, в которой отсутствует электрическая связь питающих линий 110(220) кВ смежных ТП. В [7, 8] указано, что в течение многих десятков лет принималось условие, что каждая из ТП получает питание от независимой СВЭ, не связанной какими-либо высоковольтными линиями со смежными ТП. Ошибочность схемы замещения СВЭ в нормативном документе подтверждалось в [9]. В действительности, как правило, группа ТП получает питание от одной и той же трехфазной высоковольтной линии продольного электроснабжения (ВЛПЭ). Это обстоятельство приводит к перераспределению токов короткого замыкания (КЗ) между смежными ТП и, что крайне неблагоприятно для защиты, уменьшению на десятки процентов [2, 3] значения этого тока при удаленных повреждениях, что недопустимо. Кроме того, в нормативных документах существует неопределенность в выборе расчетного напряжения на шинах ТП.

II. Полная схема замещения электроснабжения тяговых подстанций

В [1, 2] предложена новая схема замещения, исключая указанные недостатки путем введения электрической связи между питающими линиями смежных ТП и введения одного источника питания в системе СВЭ вместо двух по нормативным документам (рис. 1).

В схеме замещения по рис. 1 введена линия 110 (220) кВ с сопротивлением $X_{i,j}$, соединяющая вводы смежных ТП i и j . Тем самым сформирован треугольник Δ_{ij} сопротивлений X_{0i} , X_{0j} и $X_{i,j}$ СВЭ питания двух смежных подстанций, подсоединенных к рассматриваемой межподстанционной зоне (МПЗ). На рис. 1 X_{0i} , X_{0j} – линии 110(220) кВ, питающие смежные подстанции.

Таким образом, в соответствии с [1] схема замещения представляет треугольник сопротивлений Δ_{ij} СВЭ со значениями сопротивлений КЗ в точках i и j (X_{ci} и X_{cj}).

Региональное диспетчерское управление (РДУ) энергосистемы для расчетов системы тягового электроснабжения выдает значения сопротивления трехфазного КЗ на вводах смежных тяговых подстанций ТП1 и ТП2 X_{c1} и X_{c2} , питающих одну МПЗ.

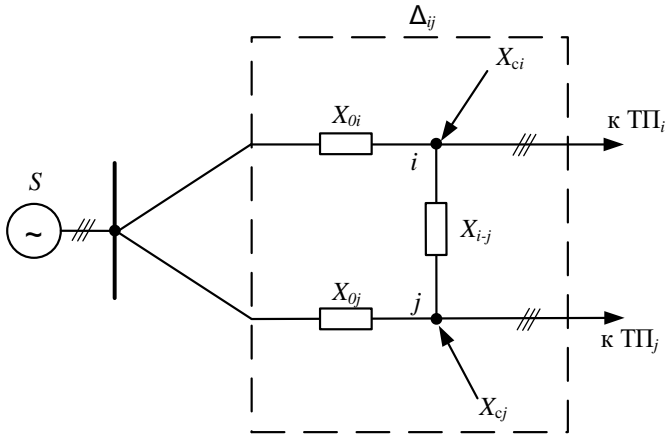


Рис. 1. Схема замещения СВЭ смежных тяговых подстанций ТП_i и ТП_j

Fig. 1. Equivalent circuit diagram of the adjacent traction substations ТП_i and ТП_j

Как пример, для схемы электроснабжения на рис. 2 покажем формирование схемы замещения СВЭ между ТП1 и ТП2 (узлы 1 и 2). Участок линии 1-2 отображается на схеме сопротивлением X_{1-2} , а сопротивления питающих линий – X_{01} и X_{02} .

Обычно для проведения расчетов треугольник сопротивлений СВЭ преобразуют в звезду сопротивлений (рис. 3) [1].

Из [10, 11] по рис. 3 запишем (обозначая X_{1-2} как X_{03}):

$$X_{01} = X_1 + X_3 + \frac{X_1 \cdot X_3}{X_2}; \quad (1)$$

$$X_{02} = X_1 + X_2 + \frac{X_1 \cdot X_2}{X_3}; \quad (2)$$

$$X_{03} = X_3 + X_2 + \frac{X_3 \cdot X_2}{X_1}; \quad (3)$$

$$\text{и } X_{c1} = \frac{X_{01} \cdot (X_{02} + X_{03})}{X_{01} + X_{02} + X_{03}}; \quad (4)$$

$$X_{c2} = \frac{X_{02} \cdot (X_{01} + X_{03})}{X_{01} + X_{02} + X_{03}}. \quad (5)$$

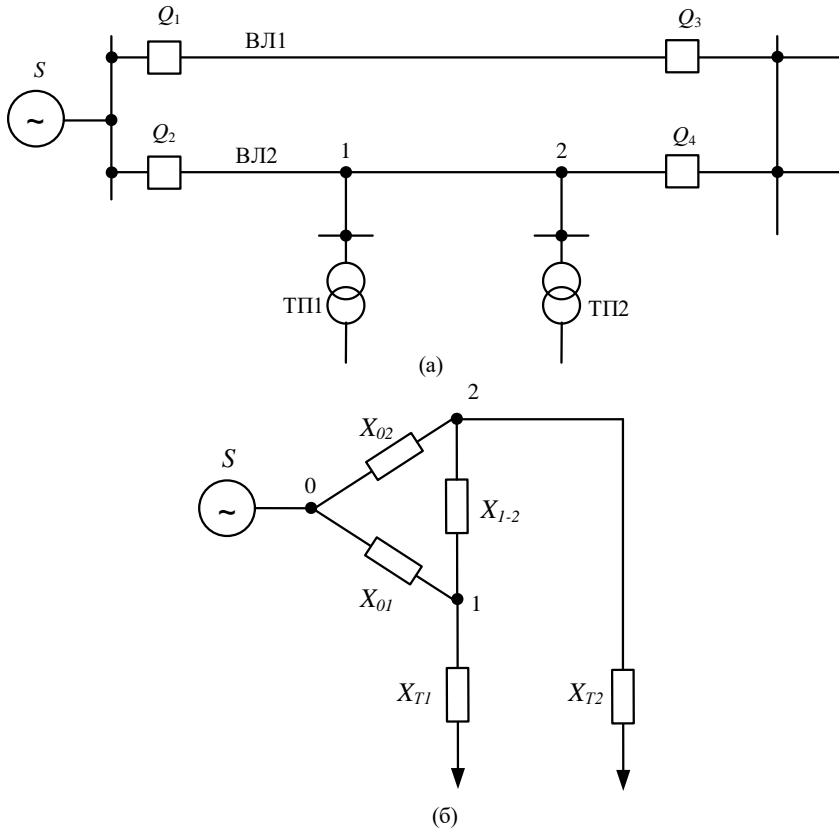


Рис. 2. Схема электроснабжения (а) и ее схема замещения (б)

Fig. 2. Power supply circuit (a) and its equivalent circuit (b)

На рис. 3 X_{c1} и X_{c2} обозначают сопротивление трехфазного КЗ в точках с1 и с2, переданные РДУ энергосистемы.

Зная X_{c1} , X_{c2} и X_{03} (X_{1-2}) из (4) и (5) формируем систему квадратных уравнений для определения X_{01} и X_{02} . Процедура расчетов X_{01} и X_{02} подробно рассмотрена в [1].

Из [10] сопротивления X_1 , X_2 , X_3 определяются по известным X_{01} , X_{02} , X_{03} :

$$X_1 = \frac{X_{01} \cdot X_{02}}{X_{01} + X_{02} + X_{03}}; \quad (6)$$

$$X_2 = \frac{X_{01} \cdot X_{03}}{X_{01} + X_{02} + X_{03}}; \quad (7)$$

$$X_3 = \frac{X_{02} \cdot X_{03}}{X_{01} + X_{02} + X_{03}}. \quad (8)$$

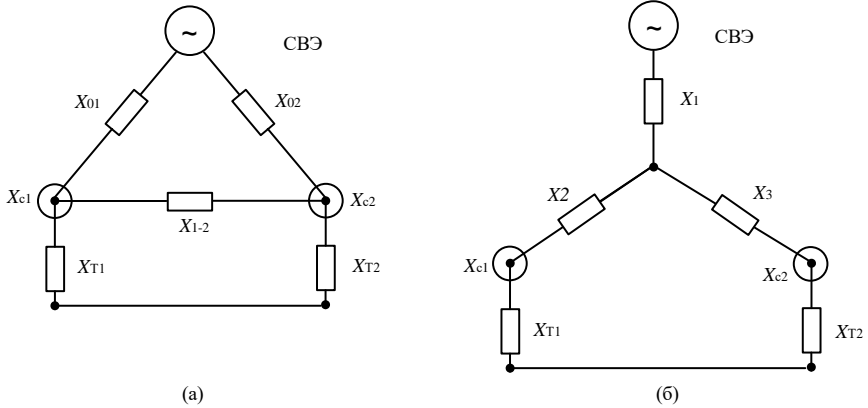


Рис. 3. Преобразование СВЭ из треугольника (а) в звезду (б)

Fig. 3. Transformation of the external power supply system from delta (a) to star (b)

III. Параметры СВЭ существующих схем тягового электроснабжения

Выполнен анализ СВЭ схем тягового электроснабжения Горьковской железной дороги (всего 49 ТП). Диапазон трехфазных сопротивлений КЗ на вводах тяговых трансформаторов, переданных от РДУ энергосистемы, представлен в табл. 1.

Таблица 1.
Сопротивления КЗ СВЭ

Table 1.
Short-circuit resistances of the external power supply system

Диапазон сопротивлений КЗ, Ом	Число ТП, шт.
от 0,1 до 0,52 (1)	26
от 0,53 (1,07) до 0,94 (1,62)	13
от 0,95 (1,64) до 1,75 (3,02)	9
2,49	1

Параметры сопротивлений СВЭ могут свидетельствовать о необходимости введения устройств повышения качества электроэнергии в тяговой сети. В частности, считаем, что для ТП в диапазоне сопротивлений СВЭ

0,53...0,94 Ом, работающих на скоростном участке Владимир–Н. Новгород Горьковской железной дороги, следует запланировать установку устройств, повышающих уровень напряжения на ТП (например, установки продольной и поперечной емкостной компенсации [12]). Для ТП с сопротивлениями СВЭ выше 0,95 Ом по всей Горьковской железной дороги следует предусмотреть указанные устройства повышения уровня напряжения.

Из (6) следует, что с увеличением сопротивления X_{03} (X_{1-2}) уменьшается сопротивление X_1 в схеме замещения «звезда» (рис. 3, б), и при $X_{03} = \infty$ сопротивление $X_1 = 0$. Это значит, что в этом случае нет электрического соединения двух питающих линий ТП. Сопротивление X_{03} (X_{1-2}) определяется следующим образом:

$$X_{03} = 1,1 \cdot 0,4 \cdot \frac{L}{k^2}, \quad (9)$$

где 1,1 – коэффициент, учитывающий непрямолнейность трассы высоковольтной линии ВЛ-110 кВ; 0,4 Ом/км – погонное сопротивление ВЛ-110 кВ; L – длина линии ВЛ-110 кВ, соединяющей вводы 110 кВ смежных подстанций; k – коэффициент трансформации тяговых трансформаторов:

$$k = \frac{110}{27,5 \cdot \sqrt{3}}.$$

IV. Основное свойство схемы замещения СВЭ

Новая схема замещения СВЭ рассмотрена в работах [1, 2]. Представленные соотношения (1)-(5) формируют откорректированную новую схему замещения [2] (рис. 4), где СТЭ – система тягового электроснабжения.

Докажем, что значения сопротивлений КЗ СВЭ X_{c1} и X_{c2} , переданные РДУ энергосистемы, равны:

$$X_{c1} = X_1 + X_2; \quad (10)$$

$$X_{c2} = X_1 + X_3. \quad (11)$$

Подставив значения (1)-(3) в (4) и (5), получим значения X_{c1} и X_{c2} по (10) и (11), которые используем в дальнейших расчетах и при формировании упрощенной схемы замещения СВЭ.

Соотношения (10) и (11) характеризуют основное свойство (ОС) новой схемы замещения, при котором сопротивление СВЭ по мощности трехфазных КЗ на вводах трансформаторов смежных ТП, переданной энергосистемой, равно сумме сопротивлений $X_1 + X_2$ на вводе ТП1 схемы замещения «звезда» и сумме сопротивлений $X_1 + X_3$ на вводе ТП2.

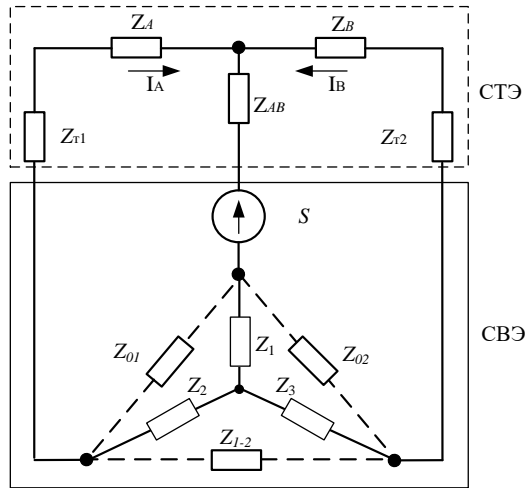


Рис. 4. Полная схема замещения системы тягового электроснабжения МПЗ

Fig. 4. Complete equivalent circuit of the traction power supply system of the inter-substation zone

V. Совместная схема замещения СТЭ и СВЭ

Для формирования полной схемы замещения (рис. 4) воспользуемся схемой замещения СТЭ из [13]. К схеме замещения СТЭ прибавим схему замещения СВЭ по разработкам в [1].

По аналогии с [13] все элементы обозначим комплексными сопротивлениями Z , однако в соответствии с [14] все расчеты будем производить для высоковольтных линий ВЛ-110(220) кВ и тяговых трансформаторов с их индуктивными сопротивлениями. СВЭ представляем в схеме «звезда» для проведения расчетов. Так как Z_1 соединено последовательно с Z_{AB} , то в расчетах к Z_{AB} прибавляем Z_1 и далее принимаем сумму $(Z_{AB} + Z_1)$, аналогично $(Z_{T1} + Z_2)$ и $(Z_{T2} + Z_3)$.

Окончательно получим в соответствие с полной схемой замещения (рис. 4) и по аналогии с нормативами [5, 13] токи КЗ:

$$I_A = \frac{U_s}{(Z_A + Z_{T1} + Z_1) + (Z_{AB} + Z_1) + \left(1 + \frac{Z_A + Z_{T1} + Z_1}{Z_B + Z_{T2} + Z_3}\right)}; \quad (12)$$

$$I_A = \frac{U_S}{(Z_B + Z_{T2} + Z_3) + (Z_{AB} + Z_1) + \left(1 + \frac{Z_B + Z_{T2} + Z_3}{Z_A + Z_{T1} + Z_2}\right)}, \quad (13)$$

где U_S – напряжение источника питания S ; Z_A, Z_B – сопротивления участков тяговой сети от ТП до места КЗ; Z_{T1}, Z_{T2} – сопротивления тяговых трансформаторов; Z_{AB} – сопротивление цепи КЗ от контактной сети

Итак, порядок расчетов по новой схеме замещения следующий:

1) формируются параметры новой схемы замещения с треугольником и предполагаемой преобразованной звезды сопротивлений СВЭ;

2) составляются квадратные уравнения для расчета сопротивлений от источника питания СВЭ до смежных ТП;

3) решаются квадратные уравнения и определяются сопротивления линий от источников питания;

4) рассчитываются параметры звезды сопротивлений;

5) рассчитываются сопротивления смежных ТП;

6) определяются токи КЗ в тяговой сети.

VI. Упрощенная схема замещения СВЭ и расчет ее параметров

Расчет параметров схемы замещения выполнен в [1]. Выше был показан объем расчетов по параметрам схемы замещения, где наиболее существенный раздел – формирование и расчет квадратных уравнений. Задача статьи – рассмотреть возможность упрощения расчетов новой схемы замещения путем исключения формирования и расчета квадратных уравнений. Задача решается путем выполнения приближенного решения с заменой значения $X_{вл1}$ на X_{c1} и $X_{вл2}$ на X_{c2} . Возможность указанной замены обоснована двумя фактами. Действительно, во-первых, практические расчеты показывают на близость результатов по расчету взаимного сопротивления питающих линий при указанных заменах (сравните X_1 и $X_{1п}$). Во-вторых, в приближенных расчетах учитываем ОС схемы замещения СВЭ, выраженное в (10) и (11). Погрешность приближенных расчетов проверяем путем выполнения реальных поверочных расчетов системы электроснабжения.

Далее рассмотрим два варианта приближенных расчетов СВЭ. В качестве примера представим формирование параметров схемы замещения СВЭ двух смежных ТП Горьковской железной дороги по данным сопротивлений КЗ от энергосистемы (табл. 2 точный расчет): для ТП Керженец – $X_{c1} = 1,33$ Ом, для ТП Быструха – $X_{c2} = 1,93$ Ом (приведено к напряжению 27,5 кВ). Сопротивление, приведенное к напряжению тяговой обмотки ($k^2 = 5,3$) $X_{1-2} = 3,8$ Ом. Схема КЗ представлена на рис. 5. По расчетным данным X_1, X_2, X_3 (рис. 3) получены I_A, I_B и суммарный I_{Σ} .

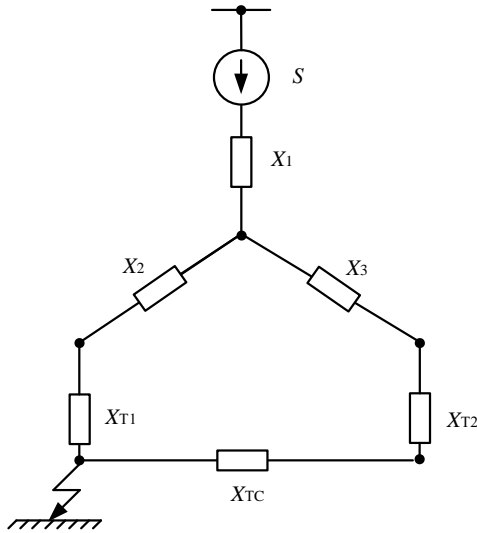


Рис. 5. Схема КЗ

Fig. 5. Short circuit diagram

Принимая $X_{вл1} = X_{c1}$, $X_{вл2} = X_{c2}$, $X_{тс} = 20$ Ом и с учетом рассчитанного $X_{1п} = X_{c1}X_{c2} / (X_{c1} + X_{c2} + X_{1-2})$ (рис. 3) выполняется расчет $X_{1п}$ (где индекс «п» указывает на приближенные значения). Учитывая, что $X_{1-2} = X_{т1} + X_{т2} + X_{тс}$ рассчитываются $X_{2п}$ и $X_{3п}$. Приближенные значения сопротивлений равны:

$$X_{1п} = \frac{X_{c1} \cdot X_{c2}}{X_{c1} + X_{c2} + X_{1-2}}; \quad (14)$$

$$X_{2п} = \frac{X_{c1} \cdot X_{1-2}}{X_{c1} + X_{c2} + X_{1-2}}; \quad (15)$$

$$X_{3п} = \frac{X_{c2} \cdot X_{1-2}}{X_{c1} + X_{c2} + X_{1-2}}. \quad (16)$$

1 вариант расчета П1. Принимая $X_{вл1} = X_{c1}$, $X_{вл2} = X_{c2}$, выполняется расчет $X_{1п}$, а $X_{2п}$ и $X_{3п}$ определяются по (10) и (11).

Этот расчет показывает (в табл. 2 строка расчет П1), что погрешность указанного приближения не превышает 2,5%. Приближенный расчет позволяет выполнить экспресс-расчеты сопротивлений СВЭ и предварительно оценить параметры системы тягового электроснабжения при проектных расчетах.

В табл. 2 ток КЗ через сопротивление X_{T1} обозначен как I_{K1} , а через сопротивление $X_{T2} - I_{K2}$.

Таблица 2.
Расчеты параметров схемы СВЭ

Table 2.
Calculations of parameters of the external power supply system circuit

Варианты расчетов	Сопротивления, Ом, питающих линий,		Сопротивления звезды, Ом			Токи КЗ, кА / погрешность, %		
	Вл1п	Вл2п	X_1	X_2	X_3	I_{K1}	I_{K2}	I_{Σ}
Точный расчет	X_{c1}	X_{c2}	0,59	0,74	1,34	3,97	0,82	4,79
Расчет П1	X_{c1}	X_{c2}	0,37	0,96	1,57	4,31/ 2,9	0,94/ 14	4,91/ 2,5
Расчет П2	$1,3X_{c1}$	$1,3X_{c2}$	0,53	0,8	1,4	3,99/ 0,5	0,83/ 1,2	4,83/ 0,8

2 вариант расчета П2. Более точный результат получается, если принять $X_{вл1п} = (1,3...1,5) \cdot X_{c1}$ и $X_{вл2п} = (1,3...1,5) \cdot X_{c2}$. Принимаем $X_{вл1п} = 1,3X_{c1}$ и $X_{вл2п} = 1,3X_{c2}$.

С учетом указанного порядок расчетов по варианту П2 следующий:

- 1) определяется приближенное значение $X_{1п}$ взаимного сопротивления питающих линий смежных подстанций по (13);
- 2) с учетом $X_{1п}$ определяются значения сопротивлений $X_{2п}$ и $X_{3п}$ по (10) и (11);
- 3) по значениям $X_{1п}$, $X_{2п}$ и $X_{3п}$ определяются токи КЗ I_A и I_B по (12) и (13).

Погрешность по предлагаемым приближенным расчетам не превышает 0,8 ... 1,2 %. Поэтому предлагается применять приближенный метод расчета по вышеуказанному алгоритму (2 вариант расчета П2).

При этом авторы повторяют мнение специалиста по эффективности инвестирования в электроэнергетику [15]: «не бояться разумных упрощений в построении инженерных расчетных моделей тех или иных явлений и процессов. В любых разделах практической электротехники объективно существуют обширные зоны неопределенностей, находить в этих условиях оптимальную модель процесса – искусство инженера».

VII. Выводы

В существующих нормативных документах допущена методическая ошибка по формированию схемы замещения СВЭ для расчетов схем тягового электроснабжения – ТП подключена к источнику питания по одной ли-

нии, хотя, как правило, она подключается к источнику питания по двум линиям. Указанное приводит к перераспределению токовой нагрузки, что определяет погрешность расчетов. В статье предложена совместная схема замещения систем внешнего и тягового электроснабжения ТП, где СВЭ представлена схемой треугольника (звездой) питающих линий ТП.

Предложенная схема замещения позволяет снизить погрешности расчетов, но появляются дополнительные расчеты при формировании и решении системы квадратных уравнений.

Для выполнения экспресс-расчетов предложен алгоритм приближенных расчетов параметров СВЭ, в соответствии с которым взаимное сопротивление питающих линий смежных ТП определяется по заданным сопротивлениям КЗ от РДУ энергосистем, а для расчета сопротивлений питающих линий ТП используется основное свойство разработанной схемы замещения СВЭ по (10) и (11). Если принять сопротивления питающих линий ТП равными 1,3...1,5 сопротивления КЗ от РДУ энергосистем и использовать разработанное ОС формирования треугольника сопротивлений СВЭ, то погрешность упрощенных расчетов сопротивления СВЭ не превышает нескольких единиц процента, что доказывает целесообразность использования упрощенных расчетов параметров СВЭ.

© Герман Л.А., 2025

© Субханвердиев К.С., 2025

© Карпов И.П., 2025

Поступила в редакцию 28.12.2024

Принята к публикации 30.01.2025

Received 28.12.2024

Accepted 30.01.2025

Библиографический список

- [1] Герман Л.А., Карпов И.П. Уточненный метод расчета токов короткого замыкания в тяговой сети переменного тока // Интеллектуальная Электротехника. 2021. № 2 (14). С. 15-25. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_2_15
- [2] Герман Л.А. Совершенствование тягового электроснабжения переменного тока для повышения пропускной способности железных дорог. М: УМЦ ЖДТ, 2024. – 192 с.
- [3] Подшивалин А.Н., Куликов А.Л. Системотехника защиты и автоматики линий электропередачи. Н. Новгород: Дятловы горы, 2024. – 332 с.
- [4] Герман Л.А., Субханвердиев К.С., Герман В.Л. Автоматизация электроснабжения тяговой сети переменного тока. М.: УМЦ ЖДТ, 2021. – 208 с.
- [5] Защита систем электроснабжения железной дороги от коротких замыканий и перегрузки: сборник СТО РЖД. Ч. 1-5. М.: ООО «Техинформ», 2019. – 304 с.
- [6] СП-224.1326000.2014. Тяговое электроснабжение железной дороги. Введ. 2014-12-01. – 85 с.

- [7] Марквардт К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. М.: Транспорт, 1982. – 528 с.
- [8] Бей Ю.М., Мамошин Р.Р., Пупынин В.Н., Шалимов М.Г. Тяговые подстанции. М.: Транспорт, 1986. – 319 с.
- [9] Жарков Ю.И., Попова Н.А., Фигурнов Е.П. Учет схем питания тяговых подстанций при расчетах коротких замыканий тяговой сети переменного тока // Вестник Научно-Исследовательского Института Железнодорожного Транспорта. 2019. № 78 (1). С. 10-18. DOI: 10.21780/2223-9731-2019-78-1-10-18
- [10] Веников В.А., Глазунов А.А., Жуков Л.А., Солдаткина Л.А. Электрические системы. М.: Высшая школа, 1971. – 440 с.
- [11] Татур Т.А., Татур В.Е. Установившиеся и переходные процессы в электрических цепях. М.: Высшая школа, 2001. – 407 с.
- [12] Караев Р.И., Волобринский С.Д., Ковалев И.Н. Электрические сети и энергосистемы. М.: Транспорт, 1988. – 326 с.
- [13] Фигурнов Е.П. Релейная защита. Ч. 2. М.: УМЦ ЖДТ, 2009. – 604 с.
- [14] Руководящие указания по релейной защите. Вып. 11. Расчеты токов короткого замыкания для релейной защиты и системной автоматики в сетях 110-750 кВ. М.: Энергия, 1979. – 152 с.
- [15] Ковалев И.Н. Электроэнергетические системы и сети. М.: УМЦ ЖДТ, 2015. – 363 с.

References

- [1] L.A. German and I.P. Karpov, “Refined method for calculating short-circuit currents in ac traction network”, *Smart Electrical Engineering*, vol. 2, no. 14, pp.15-25, 2021. DOI: 10.46960/2658-6754_2021_2_15
- [2] L.A. German, *Sovershenstvovaniye tyagovogo elektrosnabzheniya peremennogo toka dlya povysheniya propusknoy sposobnosti zheleznykh dorog [Improving AC traction power supply to increase railway capacity]*. Moscow: UMC ZDT, 2024 (in Russian).
- [3] A.N. Podshivalin and A.L. Kulikov, *Sistemotekhnika zashchity i avtomatiki liniy elektropereedachi [Systems technology for protection and automation of power lines]*. N. Novgorod: Dyatlovy gory, 2024 (in Russian).
- [4] L.A. German, K.S. Subkhanverdiev and V.L. German, *Avtomatizatsiya elektrosnabzheniya tyagovoy seti peremennogo toka [Automation of AC traction power supply]*. Moscow: UMC ZDT, 2021 (in Russian).
- [5] *Zashchita sistem elektrosnabzheniya zheleznoy dorogi ot korotkikh zamykaniy i peregruzki: sbornik STO RZD [Protection of railway power supply systems from short circuits and overload: collection of STO RZD]*. Part 1-5. Moscow: LLC «Techinform», 2019 (in Russian).
- [6] Traction power supply of the railway, SP-224.1326000.2014, Dec. 2014.
- [7] K.G. Markvardt, *Elektrosnabzhenie elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog [Electricity supply of electrified railways]*. Moscow: Transport, 1982 (in Russian).
- [8] Yu.M. Bey, R.R. Mamoshin, V.N. Pupynin and M.G. Shalimov, *Tyagovyye podstantsii [Traction substations]*. Moscow: Transport, 1986 (in Russian).
- [9] Yu.I. Zharkov, N.A. Popova and E.P. Figurnov, “Accounting power supply schemes for traction substations in the calculation of short circuits in the ac traction network”,

- Russian railway science journal*, vol. 78, no. 1, pp. 10-18, 2019. DOI: 10.21780/2223-9731-2019-78-1-10-18
- [10] V.A. Venikov, A.A. Glazunov, L.A. Zhukov and L.A. Soldatkina, *Elektricheskie sistemy [Electrical systems]*. Moscow: Higher school, 1971 (in Russian).
- [11] T.A. Tatur and V.E. Tatur, *Ustanovivshiesya i perekhodnye processy v elektricheskikh cepyah [Steady-state and transient processes in electrical circuits]*. Moscow: Higher school, 2001 (in Russian).
- [12] R.I. Karaev, S.D. Volobrinский and I.N. Kovalev, *Elektricheskie seti i energosistemy [Electric Networks and Power Systems]*. Moscow: Transport, 1988 (in Russian).
- [13] E.P. Figurnov, *Releynaya zashchita. [Relay protection]. Part 2*. Moscow: UMC ZDT, 2009 (in Russian).
- [14] *Rukovodyashchie ukazaniya po relejnoj zashchite. Vyp. 11. Raschety tokov korotkogo замыкания для релеjnoj zashchity i sistemnoj avtomatiki v setyah 110-750 kV [Guidelines for relay protection. Issue 11. Calculations of short-circuit currents for relay protection and system automation in 110-750 kV networks]*. Moscow: Energiya, 1979 (in Russian).
- [15] I.N. Kovalev, *Elektroenergeticheskiye sistemy i seti [Electric power systems and networks]*. Moscow: UMC ZDT, 2015 (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Герман Леонид Абрамович, доктор технических наук, профессор Нижегородского Института Путей Сообщения – филиала Приволжского Государственного Университета Путей Сообщения, г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Leonid A. German, D. Sci. (Eng.), professor of the Nizhny Novgorod Transport Institute – Volga State Transport University Branch, Russian Federation.

Субханвердиев Камиль Субханвердиевич, кандидат технических наук, доцент Российского университета транспорта, г. Москва, Российская Федерация.

Kamil S. Subkhanverdiev, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Russian University of Transport, Moscow, Russian Federation.

Карпов Иван Петрович, начальник электротехнической лаборатории Горьковской дирекции по энергообеспечению, Трансэнерго – филиал ОАО «РЖД», г. Нижний Новгород, Российская Федерация.

Ivan P. Karpov, head of the electrical engineering laboratory of the Gorky Directorate for Energy Supply, Transenergo – Branch of JSC «Russian Railways», Nizhny Novgorod, Russian Federation.