

Модель совместной работы системы тягового и внешнего электроснабжения

А. В. Агунов, А. Т. Бурков, М. А. Иванов

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Агунов А. В., Бурков А. Т., Иванов М. А. Модель совместной работы системы тягового и внешнего электроснабжения // Бюллетень результатов научных исследований. — 2022. — Вып. 3. — С. 24–38. DOI: 10.20295/2223-9987-2022-3-24-38

Аннотация

Цель: Повысить точность учета влияния внешних питающих сетей на работу систем тягового электро-снабжения переменного тока промышленной частоты. В статье показано, что существующие математические модели совместной работы тягового и внешнего электроснабжения обладают значительными ограничениями. Эти ограничения почти исключают возможность их практического использования. В то же время при проектировании новой электрификации требуется выбирать наиболее эффективную схему внешнего электроснабжения. При эксплуатации существующих электрифицированных участков возникает необходимость оценить величину уравнительного тока при ремонтах в сетях внешнего электроснабжения и принять решение об изменении схемы питания и секционирования. Для решения этих задач требуется соответствующая модель. **Методы:** Анализ существующих математических моделей и компьютерных программ для совместного расчета сетей тягового и внешнего электроснабжения. Разработка моделей трехфазных РУ-генераторов на базе источника ЭДС за индуктивным сопротивлением, моделей трехфазных и однофазных нагрузок. **Результаты:** В статье представлено описание математической модели, предназначенной для исследования совместной работы систем тягового электроснабжения переменного тока 25 кВ и питающих энергосистем 110–750 кВ. Рассмотрены принципы построения модели трехфазных и однофазных РУ-генераторов на базе источника ЭДС за индуктивным сопротивлением, также трехфазных и однофазных нагрузок. На основе приведенных математических выражений разработана компьютерная модель, позволяющая анализировать совместную работу трехфазных сетей внешнего электроснабжения и однофазных тяговых сетей. Модель реализована в программном пакете MATLAB-Simulink. С помощью этой компьютерной модели проанализировано влияние перетоков мощности по сети 110–330 кВ ПАО «Карелэнерго» и ПАО «ФСК ЭЭС» на уравнительные токи в тяговой сети участка Княжая — Идель Октябрьской железной дороги. **Практическая значимость:** Повышение надежности работы систем тягового электроснабжения за счет точного расчета уравнительных токов. Снижение потерь энергии в тяговой сети за счет выбора оптимальной схемы питания тяговой сети.

Ключевые слова: Тяговое электроснабжение, двухстороннее питание, уравнительный ток, поток мощности, расчет режимов, РУ-генератор.

На железных дорогах стран СНГ в системах переменного тока 25 кВ и 2×25 кВ двухстороннее питание тяговой сети от двух смежных тяговых подстанций является основной схемой. При интенсивном движении она обеспечивает более высокое напряжение на токоприемнике и меньшие потери энергии в тяговой сети [1]. В то же время схеме двухстороннего питания присущи и некоторые недостатки. Так, мощность, передаваемая по сетям внешнего электроснабжения 110–750 кВ, частично ответвляется в тяговую сеть и приводит к возникновению

в этой сети уравнительных токов. Иногда эти токи бывают столь велики, что двухстороннее питание становится просто невозможным. Часто такая ситуация возникает при производстве ремонтов в сетях внешнего электроснабжения. По этой причине в странах Европы и Китае двухстороннее питание в системах тягового электроснабжения 25 кВ и 2×25 кВ не применяется [2–4]. Частное решение задачи определения уравнительных токов в тяговой сети предложено, например, в [1, 5]. Распределение токов в линии внешнего электроснабжения и тяговой сети согласно упрощенной модели [5] представлено на рис. 1.

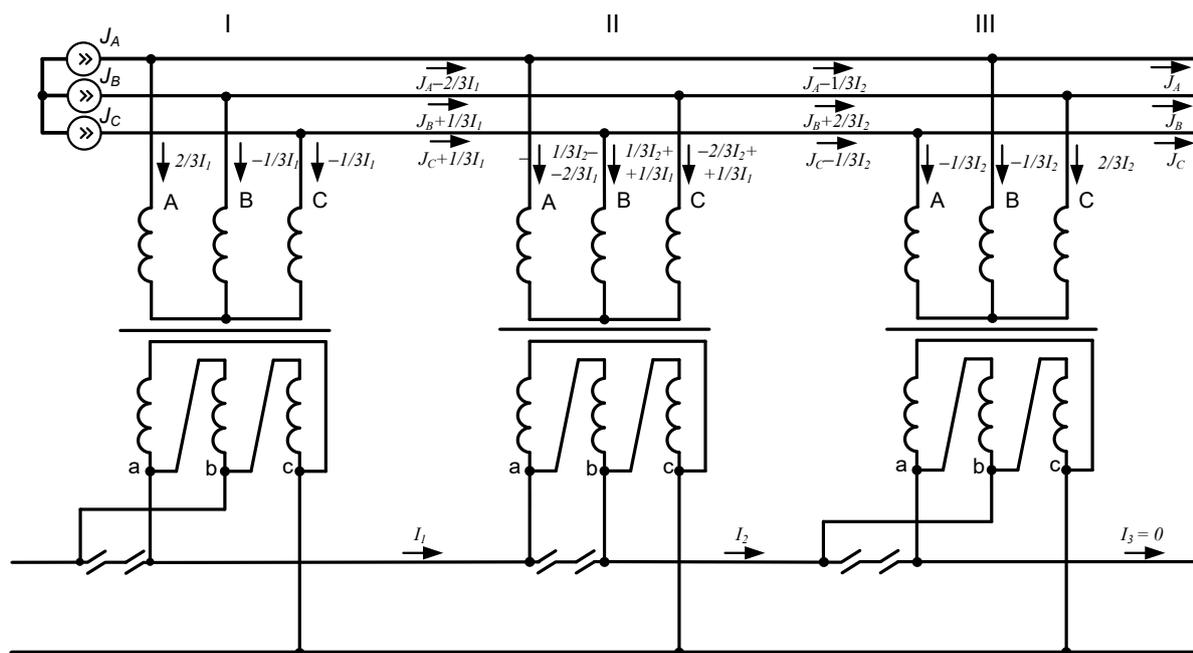


Рис. 1. Распределение токов в системе внешнего и тягового электроснабжения: J_A , J_B , J_C — задающие токи в системе внешнего электроснабжения, приведенные к уровню напряжения 27,5 кВ; I_1 , I_2 — уравнительные токи в тяговой сети межподстанционных зон I — II и II — III

Более сложные схемы замещения либо рассматривают только одну межподстанционную зону [6, 7], либо предназначены только для расчета аварийных режимов (токов коротких замыканий) [8, 9].

Однако в указанных частных решениях рассматривается случай, когда смежные тяговые подстанции непосредственно связаны и по линии внешнего электроснабжения 110–220 кВ. Наибольшие же значения уравнительных токов имеют место как раз при отсутствии такой непосредственной связи или при выводе ее в ремонт. Кроме того, требует расчета и сам ремонтный режим в системе внешнего электроснабжения. Ведь ежегодные контрольные замеры выполняются при текущей схеме сети, и распределение перетоков мощности при любых других схемах может быть определено только расчетным путем. Для расчета потокораспределения

в электрических сетях широко применяются программные комплексы RastrWin, EnergyCS Режим, DIgSILENT PowerFactory, ETAP и др. Отечественные комплексы RastrWin и EnergyCS Режим позволяют рассчитывать только симметричные сети. Однофазную тяговую сеть там можно учесть только с известными погрешностями. DIgSILENT PowerFactory позволяет работать как с трехфазными, так и с однофазными системами. Но для задач тягового электроснабжения он имеет недостаточную гибкость. ETAP с приложением eTraх позволяет решать и задачи тягового электроснабжения, но при этом имеет очень высокую стоимость. Известна также модель, разработанная А. В. Крюковым и В. П. Закарюкиным [10, 11]. Однако в ней отсутствуют модели синхронных генераторов с фиксированными пределами по выдаче/потреблению реактивной мощности. Это обстоятельство не позволяет адекватно моделировать систему внешнего электроснабжения при перетоках мощности, близких к пределу по статической устойчивости. В результате разработка модели для исследования параллельной работы системы тягового и внешнего электроснабжения является актуальной задачей.

Сегодня во многих научных и проектных организациях используется пакет MATLAB-Simulink с библиотекой SimPowerSystems (Specialized Technology). Он дает возможность моделировать и исследовать работу силовых электрических цепей. Модель сети в среде MATLAB-Simulink задается в графическом виде из библиотечных блоков. Она наглядна и легко изменяется. Для расчета установившихся режимов наиболее удобен комплексный (символьный) метод расчета (Phasor simulation). Но среди стандартных моделей из библиотек SimPowerSystems отсутствует модель генератора, способная обеспечить постоянство выдаваемой активной мощности при неизменном модуле напряжения в узле подключения (ПУ-генератор). Имеющиеся в библиотеках модели синхронных машин, турбин и регуляторов сложны и требуют большого объема вычислений. Они больше подходят для моделирования электромеханических переходных процессов.

В SimPowerSystems для создания пользовательских моделей доступны пассивные элементы цепи, а также управляемые источники тока и напряжения. На каждом шаге расчета модели электрической цепи должно выполняться условие баланса мощностей:

$$\sum_{k=1}^n \overline{Z_k} \cdot \dot{I}_k \cdot I_k^* = \sum_{k=1}^n \dot{E}_k \cdot I_k^* .$$

Из-за этого использование «классических» приемов расчета установившихся режимов на базе метода Ньютона в SimPowerSystems невозможно. В данной статье предлагается создать модель генератора на базе источника ЭДС с последовательным индуктивным сопротивлением [12].

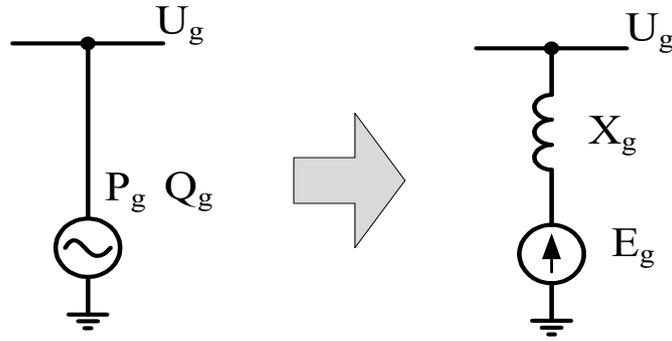


Рис. 2. Представление генератора источником ЭДС за реактивным сопротивлением

Приращение ЭДС генератора, минимизирующее отклонение напряжения в генераторном узле и активной мощности генератора от заданных, можно определить из уравнения:

$$\begin{cases} \frac{\partial P_g}{\partial E_g} \Delta E_g + \frac{\partial P_g}{\partial \delta_E} \Delta \delta_E = P_g - P_{g0} \\ \frac{\partial U_g}{\partial E_g} \Delta E_g + \frac{\partial U_g}{\partial \delta_E} \Delta \delta_E = U_g - U_{g0} \end{cases}, \quad (1)$$

где P_{g0}, U_{g0} — заданные активная мощность, Вт, и напряжение генератора, В;
 P_g, U_g — текущие активная мощность, Вт, и напряжение генератора, В;
 E_g — модуль ЭДС генератора, В;
 δ_E — фазовый угол ЭДС генератора, град.;
 ΔE_g — приращение модуля ЭДС генератора, В;
 $\Delta \delta_E$ — приращение фазового угла ЭДС генератора, град.

Частные производные напряжения и активной мощности, и активной мощности генератора определены исходя из выражения для полной мощности генератора и схемы замещения на рис. 2. Полная мощность генератора за индуктивным сопротивлением:

$$\dot{S}_g = P_g + jQ_g = 3\dot{U}_g I_g^* = 3\dot{U}_g \left(E_g^* - U_g^* \right) \underline{B}_g^*,$$

где $\underline{B}_g^* = j \frac{1}{X_g}$ — сопряженная комплексная проводимость, Сим.

Активная и реактивная мощность генератора:

$$P_g = 3U_g E_g B_g \text{Cos}(\delta_U - \delta_E - \pi / 2) = 3U_g E_g B_g \text{Sin}(\delta_U - \delta_E);$$

$$Q_g = 3U_g E_g B_g \sin(\delta_U - \delta_E - \pi/2) - 3U_g^2 B_g = -3U_g E_g B_g \cos(\delta_U - \delta_E) - 3U_g^2 B_g,$$

где δ_U — фазовый угол напряжения в генераторном узле (U_g), В.

Разрешив выражение для Q_g относительно U_g , получим:

$$U_g = \frac{-3E_g B_g \cos(\delta_U - \delta_E) - \sqrt{9E_g^2 B_g^2 \cos^2(\delta_U - \delta_E) - 12B_g Q_g}}{6B_g}.$$

Получив выражения для P_g и U_g , можно найти их частные производные по E_g и δ_A :

$$\frac{\partial P_g}{\partial E_g} = 3U_g B_g \sin(\delta_U - \delta_E);$$

$$\frac{\partial P_g}{\partial \delta_A} = -3U_g E_g B_g \cos(\delta_U - \delta_E);$$

$$\frac{\partial U_g}{\partial E_g} = -\frac{1}{2B_g} \left(B_g \cos(\delta_U - \delta_E) + \frac{3E_g B_g^2 \cos^2(\delta_U - \delta_E)}{\sqrt{9E_g^2 B_g^2 \cos^2(\delta_U - \delta_E) - 12B_g Q_g}} \right);$$

$$\frac{\partial U_g}{\partial \delta_A} = -\frac{1}{2B_g} \left(E_g B_g \sin(\delta_U - \delta_E) + \frac{3E_g^2 B_g^2 \cos(\delta_U - \delta_E) \sin(\delta_U - \delta_E)}{\sqrt{9E_g^2 B_g^2 \cos^2(\delta_U - \delta_E) - 12B_g Q_g}} \right).$$

Полученные частные производные подставляются в уравнение (1), после чего оно решается относительно ΔE_g и $\Delta \delta_A$. Значения ΔE_g и $\Delta \delta_A$ используются для расчета значений ЭДС генератора E_g и ее угла δ_A на следующем шаге. Графически процедура определения E_g и δ_A показана на рис. 3. Расчет частных производных, приращений модуля и угла ЭДС и корректировка угла и модуля ЭДС циклически происходят до тех пор, пока разности $P_r - P_{r0}$ и $U_r - U_{r0}$ не станут меньше наперед заданного малого числа (допустимой погрешности по модулю и углу ЭДС).

Минимальная и максимальная реактивная мощность генератора ограничена и определяется его PQ-диаграммой. Когда генератор выходит на максимальное или минимальное ограничение по Q , система уравнений (1) принимает иной вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial P_g}{\partial E_g} \Delta E_g + \frac{\partial P_g}{\partial \delta_E} \Delta \delta_E = P_g - P_{go} \\ \frac{\partial Q_g}{\partial E_g} \Delta E_g + \frac{\partial Q_g}{\partial \delta_E} \Delta \delta_E = Q_g - Q_{lim} \end{cases}, \quad (2)$$

где Q_{lim} — ограничение генератора по реактивной мощности, МВАр.

Если в ходе итерационного расчета реактивная мощность возвращается в разрешенный диапазон, то вновь происходит переход к расчету ΔE_g и $\Delta \delta_A$ по выражению (1).

На базе полученных соотношений была построена Simulink-модель, представленная на рис. 4.

В блоках dU/dE , dQ/dE , dU/dg , dQ/dg , dP/dg и dP/dE выполняется расчет соответствующих частных производных. Блоки dE и dg обеспечивают непосредственный расчет ΔE_g и $\Delta \delta_A$ по уравнениям (1) или (2). Триггеры PU-PQ Tr и Tr1 и переключатели Switch, Switch2, Switch3 обеспечивают при выходе на ограничение по реактивной мощности переход от расчета по уравнению (1) к расчету по уравнению (2) и обратно. Обратный переход происходит в случае, если напряжение в генераторном узле становится выше заданного.

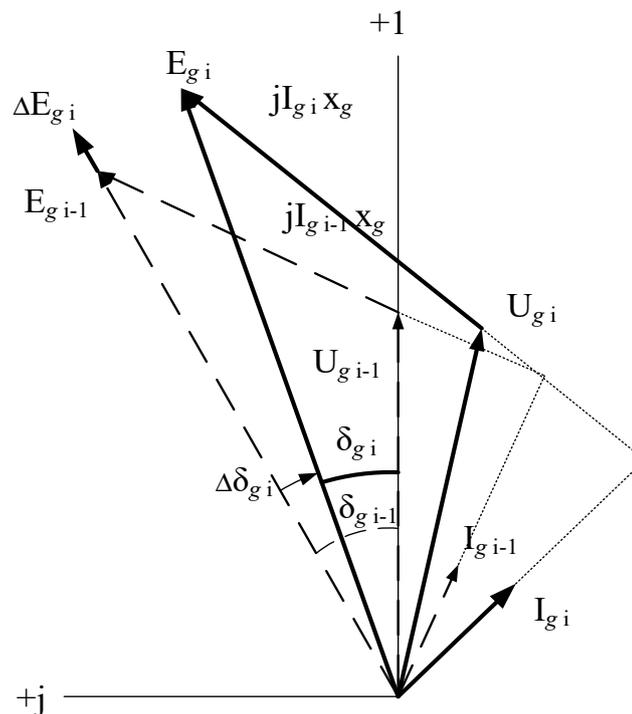


Рис. 3. Коррекция вектора ЭДС на i -м шаге расчета

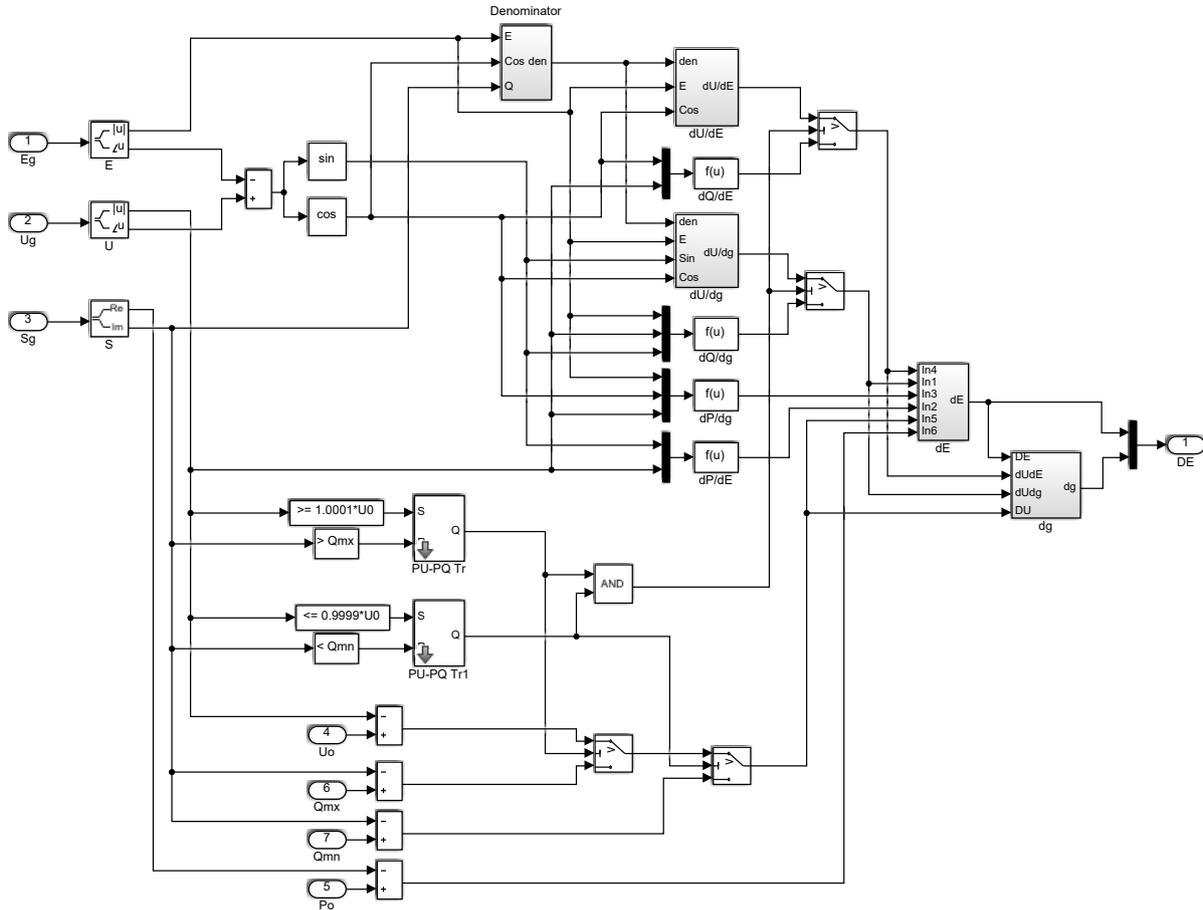


Рис. 4. Схема Simulink-модели расчета поправок вектора ЭДС

Общий вид Simulink-модели генератора показан на рис. 5. Для получения на выходе генератора трехфазной системы напряжений выходной вектор ЭДС раскладывается на три фазных составляющих. Разложение осуществляется путем умножения на оператор поворота $\hat{a} = e^{-j \cdot 120^\circ}$ во второй степени для фазы *B* и в первой степени для фазы *C*. Составляющие прямой последовательности подаются на вход управляемых источников ЭДС. Для расчета ЭДС используются напряжение и мощность прямой последовательности.

Величина реактивного сопротивления может быть принята равной синхронной индуктивности машины по поперечной оси X_q . Описанную модель можно использовать для моделирования синхронных генераторов, синхронных и статических компенсаторов, в том числе однофазных.

Модель нагрузки описывается простым соотношением:

$$\dot{I}_{II} = \frac{P_{ld} - jQ_{ld}}{3U}$$

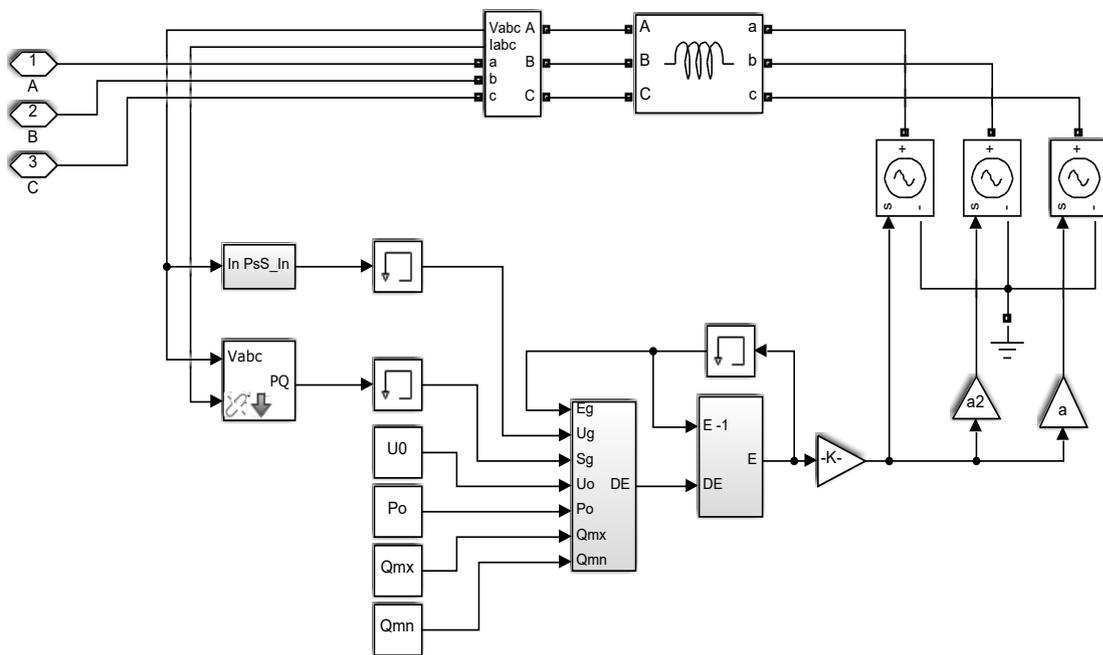


Рис. 5. Simulink-модель синхронного генератора

Для вычисления на текущем шаге задающего тока $\dot{I}_{ld i}$ используется значение напряжения с предыдущего шага \dot{U}_{i-1} . Схема Simulink-модели трехфазной нагрузки приведена на рис. 6. Для моделирования линий электропередачи, трансформаторов, реакторов использованы стандартные блоки библиотеки SimPowerSystems. Описания этих элементов представлено в справочной системе пакета. Реализованная таким образом модель была использована при реализации программ расчета систем тягового электроснабжения (свидетельства Федеральной службы по интеллектуальной собственности РФ № 2021615188 RU и 2021615190 RU), разработанных на кафедре «Электроснабжение железных дорог» ПГУПС [13].

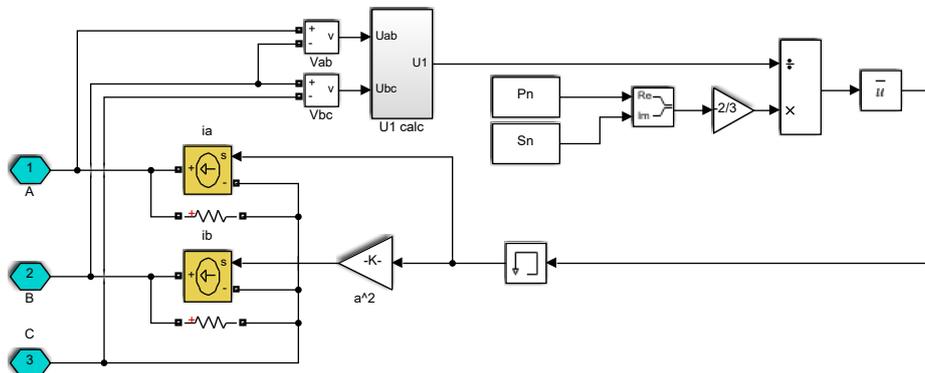


Рис. 6. Модель трехфазной симметричной нагрузки

ТАБЛИЦА 1. Результаты расчета уравнильных токов на межподстанционных зонах

Межподстанционная зона	Уравнильный ток, А, в режиме	
	лето 2012, 4:00	лето 2020, 4:00
Княжая — Полярный Круг	77	77
Полярный Круг — Лоухи	70	69
Лоухи — Энгозеро	79	75
Энгозеро — Кузема	72	68
Кузема — Кемь	62	57
Кемь — Беломорск	120	85
Беломорск — Идель	91	79

Фактически мощности генераторов, а также мощности нагрузок также приняты по данным контрольных замеров ПАО «МРСК Северо-Запада». Параметры схем замещения линий и трансформаторов определены с использованием данных [16]. Очевидно, что наибольшие различия величин уравнильных токов при замерах 2012 и 2020 гг. имеют место на межподстанционных зонах Кемь — Беломорск и Беломорск — Идель. Такое изменение обусловлено значительным уменьшением нагрузки Надвоицкого алюминиевого завода. Нагрузка снизилась со 134 МВт в 2012 г. до 19 МВт в 2020 г. Из-за этого уменьшился переток мощности по сети 110 кВ между ПС 220 кВ Кемь — ПС 110 кВ Беломорск и Ондской ГЭС. Уменьшение перетока по сети внешнего электроснабжения привело к снижению и уравнильного тока в тяговой сети.

Значительные изменения уравнильных токов происходят при выводе в ремонт отдельных линий внешнего электроснабжения. Результаты расчета таких режимов для контрольного замера режимного дня лета 2020 г. (замер в 4:00) представлены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. Результаты расчета уравнильных токов на межподстанционных зонах ремонтных режимах

Межподстанционная зона	Уравнильный ток, А, в режиме	
	Ремонт линии 110 кВ Княжая — Ковда	Ремонт линии 110 кВ Лоухи — Энегозеро
Княжая — Полярный Круг	189	74
Полярный Круг — Лоухи	5	70
Лоухи — Энгозеро	72	220
Энгозеро — Кузема	64	36
Кузема — Кемь	52	14
Кемь — Беломорск	84	71
Беломорск — Идель	78	76

Очевидно, что при размыкании линии 110 кВ между смежными тяговыми подстанциями уравнивающий ток в тяговой сети между этими же подстанциями возрастает в несколько раз. Этот ток может оказаться столь значительным, что двухстороннее питание тяговой сети оказывается невозможным, так как, например, не обеспечивается правильная работа релейной защиты. На других межподстанционных зонах, подстанции которых питаются от разомкнутой линии 110 кВ, уравнивающие токи, наоборот, ощутимо снижаются. Это обусловлено тем, что по разомкнутой линии протекает теперь только мощность местных нагрузок.

Совместный расчет систем тягового и внешнего электроснабжения с помощью предложенной модели позволяет с минимальными трудозатратами рассчитывать уравнивающие токи в тяговой сети, причем как при нормальной схеме, так и при различных ремонтных схемах сети внешнего электроснабжения. При эксплуатации действующих участков использование предложенной модели позволит выбирать наиболее эффективные схемы питания во время ремонтов в сети внешнего электроснабжения и более эффективно планировать ремонтные кампании. При проектировании новой электрификации модель позволит выбрать наиболее эффективную схему внешнего электроснабжения и схему питания тяговой сети. Схему, которая при наименьших затратах позволит обеспечить минимальные потери энергии в нормальном режиме и минимальные ограничения движения в ремонтных режимах.

Библиографический список:

1. Чернов Ю. А. Электроснабжение железных дорог: учеб. пособие / Ю. А. Чернов. — М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2016. — 406 с.
2. EN 50388 Railway Applications — Power supply and rolling stock — Technical criteria for the coordination between power supply (substation) and rolling stock to achieve interoperability. CENELEC, 03.2012
3. Liao Y. Discussion on the Design of Power Supply and Distribution System for Hefei-Nanjing Railway / Y. Liao // Building Electricity. — 2008. — Vol. 9. — Pp. 20–25.
4. Brenna M. Electrical Railway Transportation Systems / M. Brenna, F. Foadelli, D. Zaninelli // IEEE Press. — Piscataway, 2018.
5. Караев Р. И. Электрические сети и энергосистемы: учебник для вузов ж.-д. транспорта / Р. И. Караев, С. Д. Волобринский, И. Н. Ковалев. — 3 изд., перераб. и доп. — М.: Транспорт, 1988. — 326 с.
6. Варенцов В. М. Учет энергии на подстанциях переменного тока при протекании по контактной сети транзитных токов / В. М. Варенцов, А. И. Бурьяноватый, М. А. Иванов // Вестник ВНИИЖТ. — 2017. — Т. 76. — № 5. — С. 294–300. — DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2017-75-5-294-300>.

7. Косарев А. Б. Методика расчета токораспределения в тяговых сетях переменного тока. / А. Б. Косарев, Б. И. Косарев // Вестник ВНИИЖТ. — 2017. — Т. 76. — № 6. — С. 329–335. — DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2017-75-6-329-335>.
8. Жарков Ю. И. Учет схем питания тяговых подстанций при расчетах коротких замыканий в тяговой сети переменного тока / Ю. И. Жарков, Н. А. Попова, Е. П. Фигурнов // Вестник ВНИИЖТ. — 2019. — Т. 78. — № 1. — С. 10–18. — DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2019-78-1-10-18>.
9. Расчет токов короткого замыкания в тяговой сети с двухсторонним питанием / Л. А. Герман, А. С. Серебряков, А. Б. Лоскутов и др. // Электричество. — 2019. — № 5. — С. 19–23. — DOI: <http://dx.doi.org/10.24160/0013-5380-2019-5-19-23>.
10. Закарюкин В. П. Моделирование режимов систем электроснабжения железных дорог: монография / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков. — Иркутск: ИрГУПС, 2014. — 164 с.
11. Закарюкин В. П. Моделирование систем внешнего электроснабжения железных дорог переменного тока / В. П. Закарюкин, А. В. Крюков, Д. П. Вторушин. — Иркутск: ИрГУПС, 2013. — 160 с.
12. Меркурьев Г. В. Устойчивость энергосистем. Книга 1 / Г. В. Меркурьев, Ю. М. Шаргин, Г. А. Мелешкин. — СПб.: ЦПКЭ, 2006. — 368 с.
13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2021615190 Российская Федерация. Программа расчета систем тягового электроснабжения переменного тока с учетом изменяющегося напряжения на тяговой нагрузке / М. А. Иванов, А. Т. Бурков, А. В. Агунов, Д. А. Соколов; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I». — № 2021614252; заявл. 29.03.2021; опубл. 05.04.2021. — 1 с.
14. Схема и Программа перспективного развития электроэнергетики Республики Карелия на период до 2024 г. Утверждена распоряжением главы Республики Карелия А. О. Парфенчикова от 31.07.2020 г. № 475-р.
15. Результаты контрольных замеров токораспределения, нагрузок и напряжений в электрических сетях ПАО «МРСК Северо-Запада». — <https://www.mrsksevzap.ru/infodisclosure/2standartdisclosure/18results/>.
16. Справочник по проектированию электроэнергетических сетей / Под ред. Д. Л. Файбисовича. — 3 изд., перераб. и доп. — М.: НЦ ЭНАС, 2012. — 376 с.

Дата поступления: 05.07.2022

Решение о публикации: 08.08.2022

Контактная информация:

АГУНОВ Александр Викторович — д-р техн. наук, зав. кафедрой; alexagunov@mail.ru

БУРКОВ Анатолий Трофимович — д-р техн. наук, проф.; atburkov@gmail.com

ИВАНОВ Михаил Александрович — старший преподаватель; m-a-ivanov@yandex.ru

Model for Joint Operation of Traction and External Power Supply System

A. V. Agunov, A. T. Burkov, M. A. Ivanov

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Agunov A. V., Burkov A. T., Ivanov M. A. Model for Joint Operation of Traction and External Power Supply System. *Bulletin of scientific research results*, 2022, iss. 3, pp. 24–38. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2022-3-24-38

Summary

Purpose: To improve record accuracy of external power supply network influence on the operation of traction power supply systems of industrial frequency AC. The article shows that existing mathematical models of traction and external power supply joint operation have sounding limitations. These limitations almost exclude the possibility of their practical use. At the same time, when projecting a new electrification, it is required to choose the most efficient external power supply scheme. At the exploitation of existing electrified sections, the necessity arises to assess equalizing current value during repairs in external power supply networks and to adopt a decision on changing power supply and sectioning schemes. Corresponding model is required to solve these tasks. **Methods:** Analysis of existing mathematical models and computer programs for joint calculation for traction and external power supply networks. Development of three-phase PU-generator models on the basis of EMF source behind an inductive resistance, development of three-phase and single-phase load models. **Results:** The article presents a description of a mathematical model implied to study the joint operation of 25 kV AC traction power supply systems and 110-750 kV power supply systems. The principles of building the model of three-phase and single-phase PU-generators on EMF source basis behind inductive resistance as well as the models of three-phase and single-phase loads are considered. Based on the given mathematical expressions, a computer model has been developed that allows analyzing the joint operation of three-phase external power supply networks and single-phase traction ones. The model is implemented in MATLAB-Simulink software package. Using this computer model, the influence of power flows through 110–330 kV network of Karelenenergo and “FSK EAS” Public Companies on equalizing currents in the traction network of Knyazhaya — Idel section of Oktyabrskaya railway was analyzed. **Practical importance:** The reliability raise for traction power supply system operation at the expense of precise calculation of equalizing currents. Energy loss reduction in a traction network in account of traction network optimal power supply scheme choice.

Keywords: Traction power supply, two-way power supply, equalizing current, power flow, power flow calculation, PU-generator.

References

1. Chernov Yu. A. *Elektrosnabzhenie zheleznikh dorog* [Electricity supply of railways]. Moscow: FGBOU «Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte» Publ., 2016. 406 p. (In Russian)
2. EN 50388 Railway Applications — Power supply and rolling stock — Technical criteria for the coordination between power supply (substation) and rolling stock to achieve interoperability. CENELEC, 03.2012

3. Liao Y. Discussion on the Design of Power Supply and Distribution System for Hefei-Nanjing Railway, *Building Electricity*. 2008, vol. 9, pp. 20–25.
4. Brenna M., Foiadelli F., Zaninelli D. *Electrical Railway Transportation Systems*. IEEE Press, Piscataway, 2018.
5. Karaev R. I., Volobriniskiyy S. D., Kovalev I. N. *Elektricheskie seti i energosistemy* [Electrical networks and power systems]. Moscow: Transport Publ., 1988. 326 p. (In Russian)
6. Varentsov V. M., Bur'yanovatyy A. I., Ivanov M. A. Uchet energii na podstantsiyakh peremennogo toka pri protekaniy po kontaktnoy seti tranzitnykh tokov [Accounting for energy at alternating current substations when flowing through the contact network of transit currents]. *Vestnik VNIIZhT* [Vestnik VNIIZhT]. 2017, vol. 76, I. 5, pp. 294–300. DOI: 10.21780/2223-9731-2017-75-5-294-300. (In Russian)
7. Kosarev A. B., Kosarev B. I. Metodika rascheta tokoraspredeleniya v tyagovykh setyakh peremennogo toka [Methodology for calculating current distribution in AC traction networks]. *Vestnik VNIIZhT* [Vestnik VNIIZhT]. 2017, vol. 76, I. 6, pp. 329–335. DOI: 10.21780/2223-9731-2017-75-6-329-335. (In Russian)
8. Zharkov Yu. I., Popova N. A., Figurnov E. P. Uchet skhem pitaniya tyagovykh podstantsiy pri raschetakh korotkikh замыkaniy v tyagovoy seti peremennogo toka [Accounting for power supply circuits of traction substations when calculating short circuits in an alternating current traction network]. *Vestnik VNIIZhT* [Vestnik VNIIZhT.]. 2019, vol. 78, I. 1, pp. 10–18. DOI: 10.21780/2223-9731-2019-78-1-10-18. (In Russian)
9. German L. A., Serebryakov A. S., Loskutov A. B., Osokin V. L., Subkhanverdiev K. S. *Raschet tokov korotkogo замыkaniya v tyagovoy seti s dvukhstoronnim pitaniem*. *Elektrichestvo* [Calculation of short-circuit currents in a traction network with two-sided power supply. Electricity.]. 2019, I. 5, pp. 19–23. DOI: 10.24160/0013-5380-2019-5-19-23. (In Russian)
10. Zakaryukin V. P., Kryukov A. V. *Modelirovanie rezhimov sistem elektrosnabzheniya zheleznykh dorog* [Simulation of modes of power supply systems of railways]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2014. 164 p. (In Russian)
11. Zakaryukin V. P., Kryukov A. V., Vtorushin D. P. *Modelirovanie sistem vneshnego elektrosnabzheniya zheleznykh dorog peremennogo toka* [Modeling of external power supply systems for AC railways]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2013. 160 p. (In Russian)
12. Merkur'ev G. V. *Ustoychivost' energosistem* [Stability of power systems]. St. Petersburg: TsPKE Publ., 2006. 368 p. (In Russian)
13. Ivanov M. A., Burkov A. T., Agunov A. V., Sokolov D. A. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM 2021615190 Rossiyskaya Federatsiya. Programma rascheta sistem tyagovogo elektrosnabzheniya peremennogo toka s uchetom izmenyayushchegosya napryazheniya na tyagovoy nagruzke; zayavitel' i pravoobladatel' Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya «Peterburgskiy gosudarstvennyy universitet putey soobshcheniya Imperatora Aleksandra I»* [Certificate of state registration of the computer program 2021615190 Russian Federation. Calculation program for alternating current traction power

supply systems taking into account the changing voltage on the traction load; applicant and copyright holder Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Petersburg State University of Railways of Emperor Alexander I”]. 2021. 1 p. (In Russian)

14. *Skhema i Programma perspektivnogo razvitiya elektroenergetiki Respubliki Kareliya na period do 2024 goda. Utverzhdena rasporyazheniem glavy Respubliki Kareliya A.O. Parfenchikova № 475-r ot 31.07.2020* [Scheme and Program for the long-term development of the electric power industry of the Republic of Karelia for the period up to 2024. Approved by the order of the Head of the Republic of Karelia A.O. Parfenchikov No. 475-r of 07/31/2020]. (In Russian)

15. *Rezul'taty kontrol'nykh zamerov potokoraspredeleniya, nagruzok i napryazheniy v elektricheskikh setyakh PAO «MRSK Severo-Zapada»* [Results of control measurements of flow distribution, loads and voltages in the electric networks of PJSC IDGC of the North-West]. Available at: <https://www.mrsksevzap.ru/infodisclosure/2standartdisclosure/18results>. (In Russian)

16. *Spravochnik po proektirovaniyu elektroenergeticheskikh setey* [Reference book on the design of electric power networks]. Moscow: NTs ENAS Publ., 2012. 376 p. (In Russian)

Received: July 05, 2022

Accepted: August 08, 2022

Author's information:

Aleksander V. AGUNOV — Dr. Sci. in Engineering, Department Head; alexagunov@mail.ru

Anatoly T. BURKOV — Dr. Sci. in Engineering, Professor; atburkov@gmail.com

Mikhail A. IVANOV — Senior Lecturer; m-a-ivanov@yandex.ru