

УДК 621.311

## Моделирование скин-эффекта в сталеалюминиевых проводах

МАНУСОВ В.З.<sup>1</sup>, БЕЛОСВЕТОВ А.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ЮГУ, Ханты-Мансийск, Россия

<sup>2</sup> СГУВТ, Новосибирск, Россия

*В воздушных линиях электропередачи из сталеалюминиевых проводов часть потерь активной мощности обусловлена высшими гармоническими составляющими тока. Это отражается в искажении синусоиды тока и вытеснении тока к поверхности проводника с повышением частоты (скин-эффект). Наряду с этим, повышение частоты в электрических и автономных системах электроснабжения (например, до 400 или 800 Гц) целесообразно для существенного снижения массогабаритных характеристик, особенно у мобильных объектов. В статье приведены математические модели и результаты моделирования методом конечных элементов с учётом влияния температуры коэффициентов увеличения активного сопротивления от скин-эффекта. Сравнительный анализ показал возможность использования аналитического метода определения сопротивления сталеалюминиевых проводов с учётом высших гармонических составляющих тока. Рассмотрено два метода для получения аналитических характеристик коэффициентов скин-эффекта в проводах линий электропередачи. Показано, что многожильный провод можно рассматривать как «эквивалентный» однородный (моножильный) в случае, если объём содержания стали не превышает 25 % общего объёма.*

**Ключевые слова:** линия электропередачи, активное сопротивление, скин-эффект, высшие гармоники, потери мощности

Для централизованных и автономных систем электроснабжения характерен рост нелинейных нагрузок [1–4], подключаемых на разных уровнях напряжения и ступенях передачи и распределения электроэнергии. Нелинейные нагрузки наряду с энергоустановками распределенной генерации [5] являются причиной появления в высоковольтных электрических сетях высших гармонических составляющих (ВГ) тока [6, 7], снижающих качество поставляемой электроэнергии [8]. ВГ вызывают дополнительный нагрев питающих линий электропередачи (ЛЭП), что приводит к сокращению срока службы электрооборудования и преждевременному износу, и в итоге, к экономическому ущербу для энергосистемы [9, 10].

Наличие ВГ выражается в искажении синусоиды (несинусоидальности) тока ЛЭП и усилении скин-эффекта. Вместе с этим увеличиваются потери электроэнергии, что снижает технико-экономические показатели и энергоэффективность электроэнергетических систем [11]. По результатам инструментальных обследований [12, 13] потери электроэнергии от несинусоидальности токов в воздушных ЛЭП составляют порядка 13–15 %, а в отдельных случаях – 22–25 % [14].

Цель исследований – повышение точности оценки дополнительных потерь активной мощности от ВГ в

сталеалюминиевых проводах ЛЭП, обусловленных увеличением активного сопротивления от скин-эффекта.

**Анализ влияния ВГ на потери активной мощности.** Дополнительные потери активной мощности в ЛЭП, обусловленные ВГ тока, определяются [15]:

$$\Delta P_{\Sigma} = I_1^2 R_1 + I_v^2 R_v, \quad (1)$$

где  $I_1$  и  $I_v$  – среднеквадратичные значения фазного тока 1-й (основной) и  $v$ -й гармоник в проводнике, А;  $R_1$  и  $R_v$  – активные сопротивления провода на основной и  $v$ -й гармониках, Ом;  $v$  – номер гармоники.

Практический интерес представляют ВГ до 40 порядка, нормируемые ГОСТ 32144-2013 [8]. Суммарные потери от ВГ тока в ЛЭП:

$$\Delta P_v^{2-40} = \sum_{v=2}^{40} I_v^2 R_v. \quad (2)$$

При взаимодействии электромагнитного и электростатического полей вне проводника, определяемых вектором Умова–Пойнтинга, электроэнергия передается вдоль ЛЭП. При этом часть электромагнитного поля проникает в материал проводника и создаёт дополнительные потери. Такое явление вытеснения тока получило название «скин-эффект». С увеличением частоты гармонических составляющих тока эффект

усиливается. Это означает, что для гармоник порядка  $v > 1$  при определении потерь активной мощности необходимо учитывать увеличение активного сопротивления провода, которое характеризуется коэффициентом поверхностного эффекта. С учётом данного параметра (2) принимает вид

$$\Delta P_v^{2-40} = \sum_{v=2}^{40} I_v^2 R_0 k_v(f), \quad (3)$$

где  $k_v(f)$  – коэффициент скин-эффекта от  $v$ -й гармоники, отн. ед.;  $R_0$  – активное сопротивление провода постоянному току, Ом.

**Математическая модель эффекта вытеснения тока.** Математическая модель скин-эффекта при неравномерном распределении тока в цилиндрическом проводе круглого сечения представлена в цилиндрической системе координат в изотропной среде [16]. На основе уравнений Максвелла можно привести формулу Умова–Пойнтинга. В практических условиях часто используются приближённые формулы, не требующие громоздких вычислений. Так, в [16] коэффициент скин-эффекта определяют как

$$k_v(f) = \frac{R_v}{R_0} = \begin{cases} 1 + \frac{\chi^4}{3} & \text{при } \chi < 1; \\ \chi + \frac{1}{4} + \frac{3}{64\chi} & \text{при } \chi > 1; \\ \chi + 0,265 & \text{при } \chi > 30, \end{cases} \quad (4)$$

где

$$\chi = \frac{r}{2} \sqrt{\frac{\omega \mu \gamma}{2}} \quad (5)$$

– дополнительный параметр, используемый в расчетах;  $r$  – радиус проводника, м;  $\omega = 2\pi f$  – угловая частота, рад/с,  $f = 50$  Гц;  $\mu$  – абсолютная магнитная проницаемость проводника, Гн/м;  $\gamma$  – удельная проводимость, См/м.

По результатам теоретических исследований [17] предлагается рассчитывать коэффициент скин-эффекта для алюминиевых проводов через глубину скин-слоя (табл. 3.17а [18]):

$$\delta = \frac{83}{\sqrt{f}}; \quad (6)$$

$$x = \frac{3,96}{d/\delta} + \frac{3,8}{(d/\delta)^2} + \frac{18}{(d/\delta)^3}; \quad (7)$$

$$k_v(f) = 1 + \frac{e^{-x}}{1 - e^{-x}}, \quad (8)$$

где  $\delta$  – глубина поверхностного слоя, мм;  $d$  – диаметр проводника, мм.

Значения коэффициента скин-эффекта можно полу-

чить по упрощенной математической модели, например в [19] предлагается:

$$k_v(f) \approx 0,47\sqrt{v}. \quad (9)$$

При условии резкого проявления поверхностного эффекта можно воспользоваться формулой [20]:

$$k_v(f) = \sqrt{v}. \quad (10)$$

Для практических расчетов предлагается [21]:

$$k_v(f) = \sqrt[3]{v}. \quad (11)$$

Оценка влияния скин-эффекта по (9)–(11) приводит к несколько завышенным значениям для алюминиевых и медных проводников, поскольку в них не учитывается сечение самого провода.

Для определения коэффициента скин-эффекта изменяют алгоритм расчёта, стандартизированный Международной электротехнической комиссией (МЭК) [22]. При оценке влияния скин-эффекта на провода ЛЭП эффектом близости, как правило, пренебрегают, поскольку расстояние между соседними проводами значительно превышает диаметр самого провода [23]. В этом случае коэффициент, учитывающий влияние поверхностного эффекта на активное сопротивление, согласно рекомендациям МЭК определяется выражением

$$k_v(f) = \frac{R_v}{R_0'} = \begin{cases} 1 + \frac{x_s^4}{192 + 0,8x_s^4} & \text{при } 0 < x_s \leq 2,8; \\ 0,864 - 0,0177x_s + 0,0563x_s^2 & \text{при } 2,8 < x_s \leq 3,8; \\ 0,354x_s + 0,267 & \text{при } x_s > 3,8, \end{cases} \quad (12)$$

где

$$x_s = \sqrt{\frac{8\pi/k_s \cdot 10^{-7}}{R_0'}}; \quad (13)$$

$R_0'$  – сопротивление проводника постоянному току при максимальной рабочей температуре, определяемой типом используемой изоляции и установленной в стандарте или технических условиях на кабель конкретного типа [22], Ом;  $k_s$  – экспериментальный коэффициент, зависящий от конструкции проводника (для монометаллического цилиндра  $k_s = 1$ , для провода проволоочной конструкции  $k_s = 1$ , т.е. нет отличия влияния коэффициентов монолитной и проволоочной конструкций).

На рис. 1 приведены коэффициенты скин-эффекта для гармоник повышенной частоты с применением уравнений Бесселя для сплошного алюминиевого провода сечением 300 мм<sup>2</sup>, полученные для температур от –40 до +40 °С. Наглядное графическое представление показывает снижение удельной проводимости алюминия при нагреве. Из графика видно, что влияние скин-эффекта снижается.

**Скин-эффект в сталеалюминиевых проводах.** Математические модели скин-эффекта, приведённые выше, применимы для сплошного круглого провода (монометаллического цилиндра). Упрощенный метод оценки влияния скин-эффекта на активное и индуктивное сопротивления проводов воздушных линий и сопоставление результатов с расчетами по уравнениям Бесселя приведены в [24]. Однако данный метод применим при рассмотрении провода воздушной ЛЭП как круглого однородного, т.е. без учета его многожильной конструкции. О необходимости аналитической модели, адекватно отражающей процесс вытеснения тока к поверхности сталеалюминиевого провода, упоминают в [25].

Сталеалюминиевые провода чувствительны к воздействию окружающей среды из-за их использования на открытом воздухе, что приводит к значительным

колебаниям температуры провода. Однако основным препятствием при разработке единой методологии расчёта активного сопротивления сталеалюминиевых проводов на ВГ является их неоднородность, выраженная многожильной конструкцией провода. В связи с этим явление эффекта вытеснения тока в проводах с проволочной конструкцией исследуется с применением математического моделирования методом конечных элементов [26]. Конструктивное исполнение сталеалюминиевых проводов рассматривается без учета скрутки алюминиевых и стальных проволок. Это позволяет провести корректную оценку влияния температуры на скин-эффект.

Результаты математического моделирования коэффициента скин-эффекта  $k_v(f)$  для провода АС 300/39 в зависимости от температуры представлены на рис. 2.

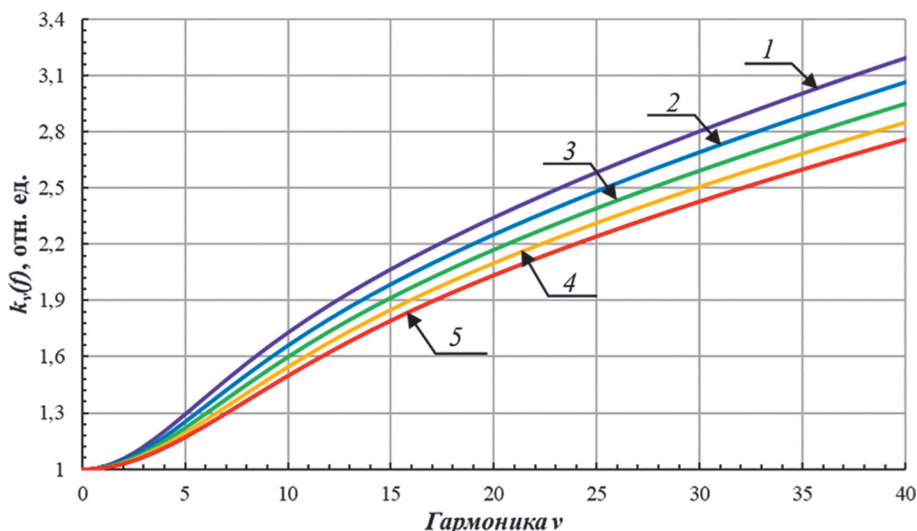


Рис. 1. Зависимости  $k_v(f)$  для круглого алюминиевого провода 300 мм<sup>2</sup> при температуре: 1 –40 °C; 2 –20 °C; 3 0 °C; 4 +20 °C; 5 +40 °C

Fig. 1.  $k_v(f)$  dependencies for 300 mm<sup>2</sup> round aluminum wire at the temperature: 1 –40 °C; 2 –20 °C; 3 0 °C; 4 +20 °C; 5 +40 °C

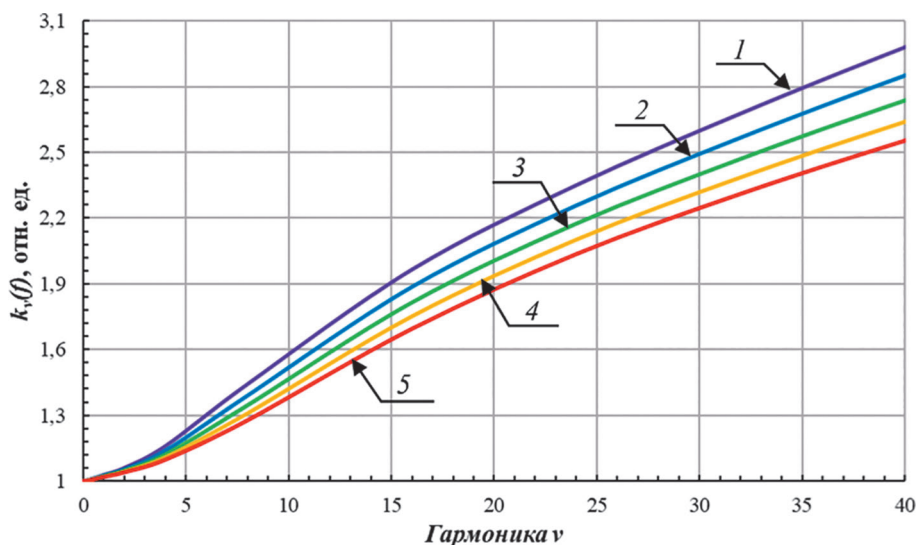


Рис. 2. Зависимости  $k_v(f)$  для провода АС 300/39 при температуре: 1 –40 °C; 2 –20 °C; 3 0 °C; 4 +20 °C; 5 +40 °C

Fig. 2.  $k_v(f)$  dependencies for ACSR 300/39 wire at the temperature: 1 –40 °C; 2 –20 °C; 3 0 °C; 4 +20 °C; 5 +40 °C

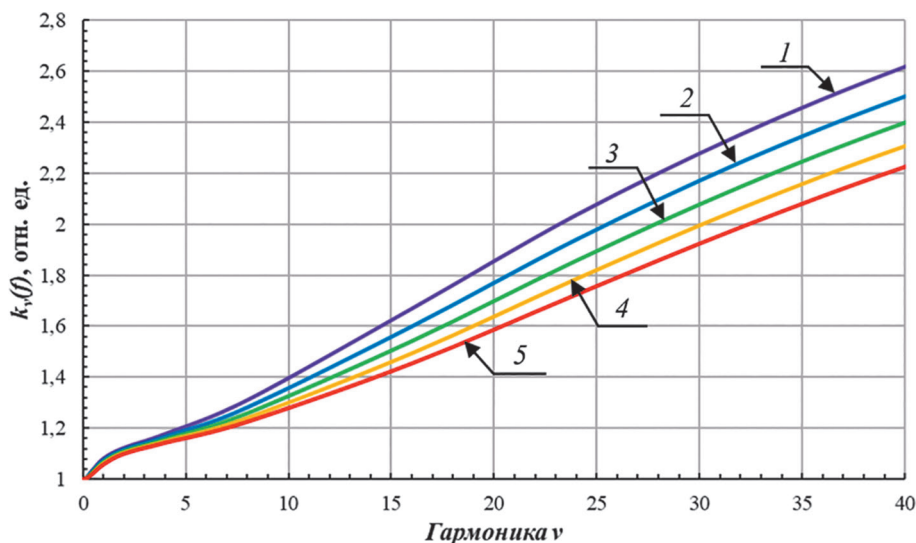


Рис. 3. Зависимости  $k_v(f)$  для провода АС 300/204 при температуре: 1 –  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 2 –  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 3 –  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 4 –  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 5 –  $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fig. 3.  $k_v(f)$  dependencies for ACSR 300/204 wire at temperature: 1 –  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 2 –  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 3 –  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 4 –  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 5 –  $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$

По аналогии на рис. 3 представлены результаты моделирования провода АС 300/204. Зависимости (рис. 3) показывают, что при частоте гармоник от 0 до 2 увеличение  $k_v(f)$  составляет около 10 %. Это результат резкого проявления скин-эффекта в стали, составляющей ~40 % общего сечения провода. Наблюдается тенденция: при нагревании провода влияние эффекта вытеснения тока на проводник из-за снижения электропроводимости уменьшается.

Практический интерес представляет сопоставление полученных результатов для сталеалюминевых проводов с конструкцией биметаллического цилиндра. Пример такого конструктивного исполнения приведён на рис. 4. Сечение алюминиевой части  $S_1$  равно общему сечению алюминиевых жил в проводе марки АС, а сечение стальной части  $S_2$  – общему сечению стальных проволок. Таким образом, проволочная структура алюминиевой и стальной частей упрощается путем замены на сплошные компоненты из алюминия и стали.

На рис. 5 приведены зависимости коэффициента скин-эффекта  $k_v(f)$  при температуре от  $-40$  до  $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$  для провода АС 300/39 и сталеалюминиевого цилиндра и аналогично для провода АС 300/204 и его цилиндрического вида.

**Обсуждение результатов.** При оценке влияния скин-эффекта на активное сопротивление можно представлять многожильную структуру провода некоторым эквивалентом в виде биметаллического цилиндра с алюминиевой и стальной сплошными средами. На этом основании выполнено математическое моделирование скин-эффекта для проводов АС 300/204 и его цилиндрического эквивалента в диапазоне температур от  $-40$  до  $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Результаты моделирования приведены на рис. 6.

В связи с незначительным расхождением до 21-й гармоники (рис. 6) в этом диапазоне частот можно сде-

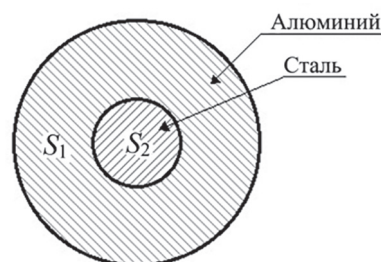


Рис. 4. Сталеалюминиевый цилиндрический проводник

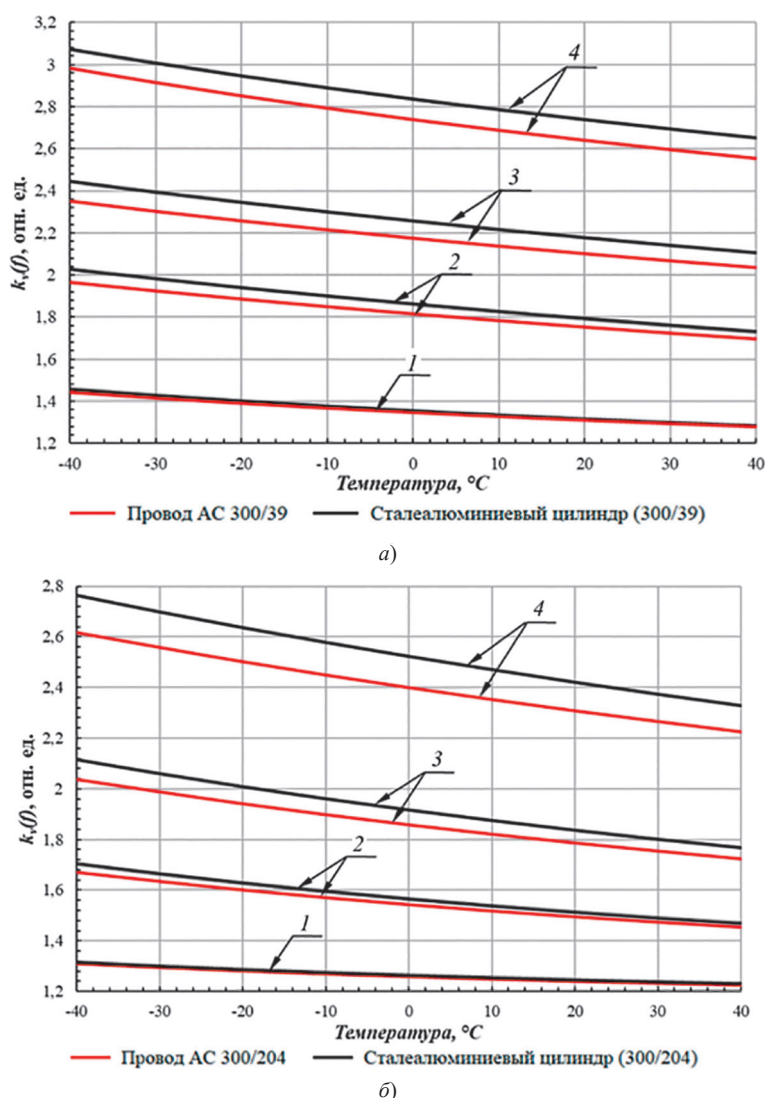
Fig. 4. Steel-aluminium cylindrical conductor

лать допущение, упрощающее модель: переход от проволочной «зернистой» структуры к цилиндрическому эквиваленту с алюминиевой и стальной сплошными средами. От 3-й до 21-й гармоники отклонение коэффициента вытеснения тока вышеприведенных моделей не превышает 3 % в диапазоне температур от  $-40$  до  $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Следует отметить, что у провода АС 300/39 скин-эффект не проявляется резко, поскольку содержание стали в проводе составляет ~11,5 %, что отражается в совпадении характеристик  $k_v(f)$  на рис. 1 и 2. Поэтому в сталеалюминиевых проводах с малым объемом стального сердечника для определения влияния скин-эффекта вполне допустима замена двухкомпонентного провода (алюминий-сталь) на однородный алюминиевый провод. Это подтверждается сравнением значений  $k_v(f)$ , полученных при моделировании сталеалюминиевого и сплошного алюминиевого проводов (рис. 7).

Видно, что значения  $k_v(f)$  для 8, 16, 24 и 40-й гармоник практически совпадают. Это позволяет получить аналитическое выражение для расчета коэффициента скин-эффекта проводов марки АС с незначительным содержанием стали через «эквивалентное» сечение сплошного алюминиевого провода. Подобные характе-





**Рис. 5.** Зависимости  $k_s(f)$  многожильного АСР 300/39 и сталеалюминиевого цилиндра (а) и многожильного АСР 300/204 и сталеалюминиевого цилиндра (б) от температуры при частоте: 1 – 400 Гц; 2 – 800 Гц; 3 – 1200 Гц; 4 – 2000 Гц

**Fig. 5.**  $k_s(f)$  temperature dependences of multicore ACSR 300/39 and steel-aluminium cylinder (a) and multicore ACSR 300/204 and steel-aluminium cylinder (b) at frequency: 1 – 400 Гц; 2 – 800 Гц; 3 – 1200 Гц; 4 – 2000 Гц

ристики скин-эффекта провода АСР 300/39 и сплошного алюминиевого провода  $S = 250 \text{ мм}^2$  при различной температуре проиллюстрированы на рис. 8.

**Выводы.** Сталеалюминиевые провода проволочной структуры с содержанием стали до 25 % общего сечения провода при вычислении скин-эффекта  $k_s(f, T)$  могут быть эквивалентно представлены однородным алюминиевым проводом для гармонических составляющих тока до 40-й гармоники.

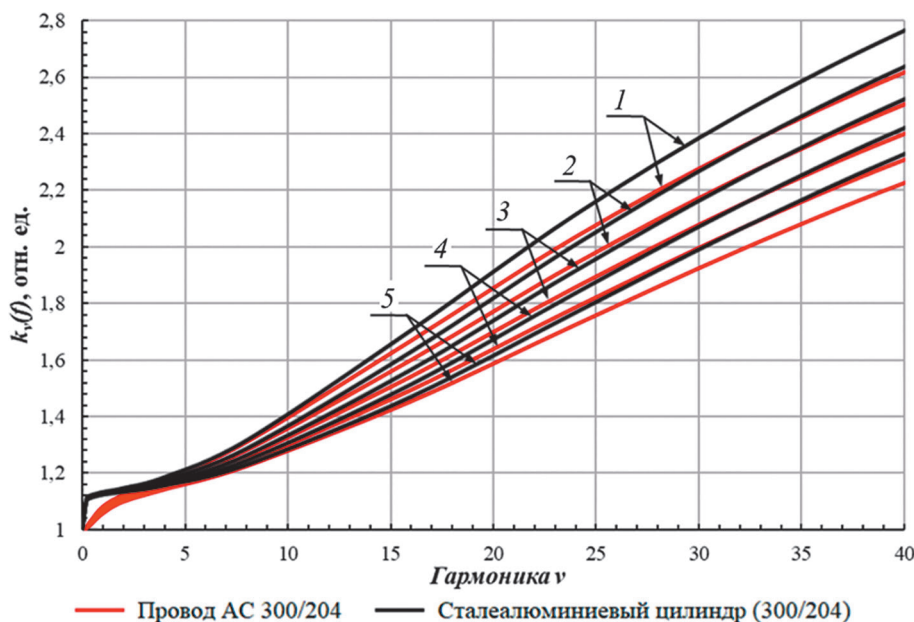
Сталеалюминиевые провода проволочной структуры с содержанием стали более 25 % общего сечения провода при вычислении скин-эффекта  $k_s(f, T)$  для 3 – 21-й гармоник могут быть представлены в виде биметаллического цилиндра с алюминиевой и стальной сплошными средами.

Со снижением температуры провода влияние скин-эффекта на его активное сопротивление возрастает.

*Исследования проведены с использованием программы «ELCUT профессиональный», предоставленной ООО «Тор», Санкт-Петербург.*

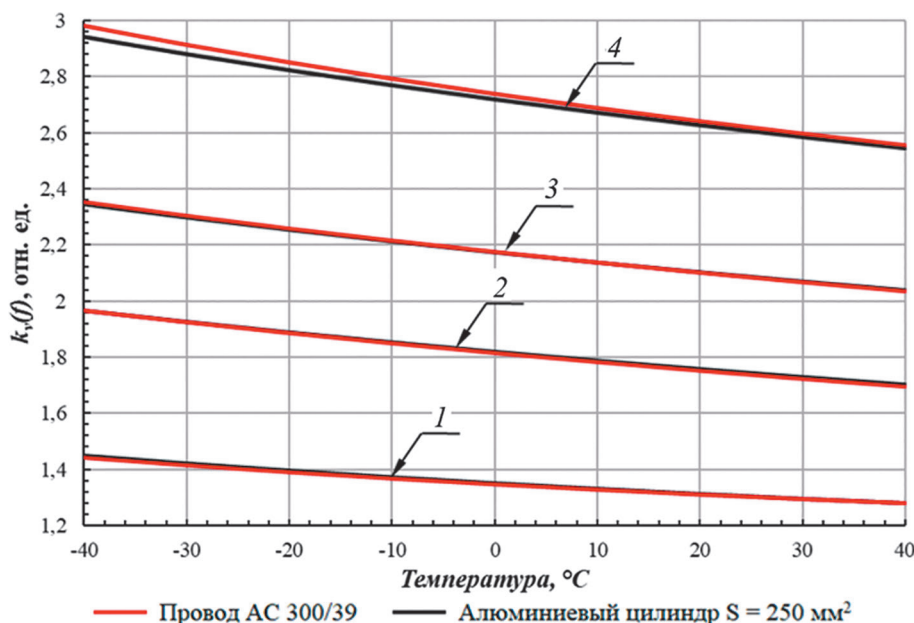
#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шандрыгин Д.А. и др. Анализ резонансных режимов в электроэнергетических системах с тяговой нагрузкой. – Вестник Иркутского государственного технического университета, 2020, т. 24, № 2, с. 396–407.
2. Ashraf N. et al. Power Quality Analysis of the Output Voltage of AC Voltage and Frequency Controllers Realized with Various Voltage Control Techniques. – Applied Sciences, 2021, vol. 11, iss. 2, DOI: 10.3390/app11020538.
3. Dutta N., Kaliannan P., Subramaniam U. Experimental Analysis of PQ Parameter Estimation of VFD Drives. – IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, vol. 937, DOI: 10.1088/1757-899X/937/1/012042.
4. Jyothi R. et al. IoT Application for Real-Time Condition Monitoring of Voltage Source Inverter Driven Induction Motor. –



**Рис. 6.** Зависимости  $k_v(f)$  провода АС 300/204 и сталеалюминиевого цилиндра от гармоники при температуре: 1 – –40 °C; 2 – –20 °C; 3 – 0 °C; 4 – +20 °C; 5 – +40 °C

**Fig. 6.**  $k_v(f)$  harmonic dependences for ACSR 300/204 wire and steel-aluminium cylinder at the temperature: 1 – –40 °C; 2 – –20 °C; 3 – 0 °C; 4 – +20 °C; 5 – +40 °C



**Рис. 7.** Зависимости  $k_v(f)$  у многожильного АС 300/39 и алюминиевого цилиндрического провода 250 мм² от температуры при частоте: 1 – 400 Гц; 2 – 800 Гц; 3 – 1200 Гц; 4 – 2000 Гц

**Fig. 7.**  $k_v(f)$  temperature dependences of multicore ACSR 300/39 and 250 mm² aluminium cylinder wire at frequency: 1 – 400 Hz; 2 – 800 Hz; 3 – 1200 Hz; 4 – 2000 Hz

Innovative Data Communication Technologies and Application, 2021, vol. 59, pp. 97–105, DOI: 10.1007/978-981-15-9651-3\_8.

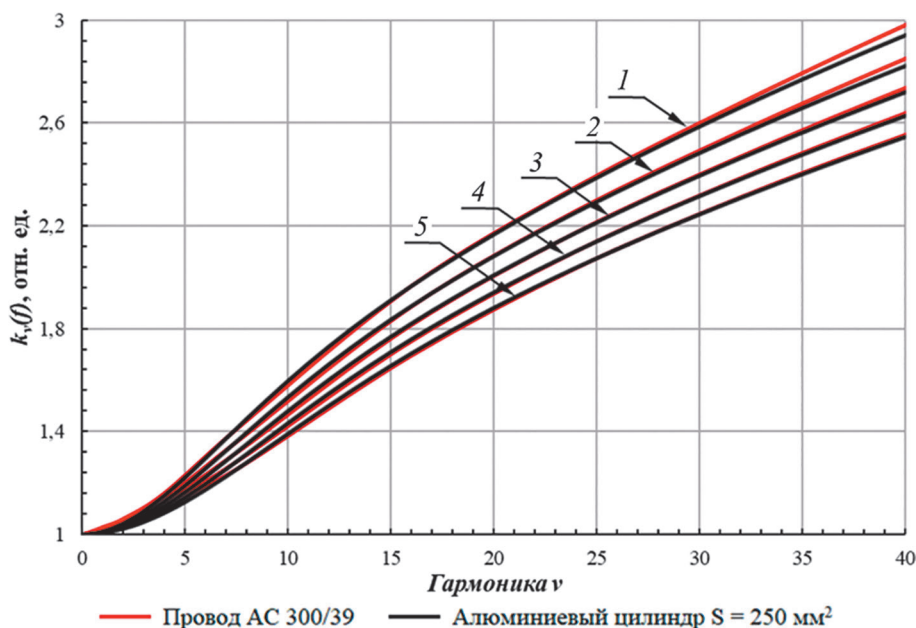
5. **Hu H. et al.** Overview of Harmonic and Resonance in Railway Electrification Systems. – IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, vol. 54, No. 5, pp. 5227–5245, DOI: 10.1109/TIA.2018.2813967.

6. **Levačić G., Župan A., Čurin M.** An Overview of Harmonics in Power Transmission Networks. – First International Colloquium on Smart Grid Metrology (SmaGriMet), 2018, DOI: 10.23919/SMAGRIMET.2018.8369828.

7. **Аррилага Дж., Брэдли Д., Боджер П.** Гармоники в электрических системах / Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1990, 320 с.

8. **ГОСТ 32144–2013.** Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014, 16 с.

9. **Silvério E.T., Macedo Junior J.R.** Measuring and Modeling the Skin Effect for Harmonic Power Flow Studies. – Energies, 2023, vol. 16, DOI: 10.3390/en16237913.



**Рис. 8.** Зависимости  $k_v(f)$  провода АС 300/39 и алюминиевого цилиндрического провода  $S = 250 \text{ мм}^2$  от гармоники при температуре: 1 –  $-40^\circ\text{C}$ ; 2 –  $-20^\circ\text{C}$ ; 3 –  $0^\circ\text{C}$ ; 4 –  $+20^\circ\text{C}$ ; 5 –  $+40^\circ\text{C}$

**Fig. 8.**  $k_v(f)$  dependences for ACSR 300/39 wire and  $250 \text{ mm}^2$  aluminium cylinder wire on the harmonic at the temperature: 1 –  $-40^\circ\text{C}$ ; 2 –  $-20^\circ\text{C}$ ; 3 –  $0^\circ\text{C}$ ; 4 –  $+20^\circ\text{C}$ ; 5 –  $+40^\circ\text{C}$

10. Zhang X.-P., Yan Z. Energy Quality: A Definition. – IEEE Open Access Journal of Power and Energy, 2020, vol. 7, pp. 430–440, DOI: 10.1109/OAJPE.2020.3029767.

11. Product data Bulletin No. 8803PD9402. Causes and Effects of Variable Frequency Drives Relative to the IEEE 519-1992 Standard. Raleigh, U.S.A.: SQUARE D, 1994, 8 p.

12. Харлов Н.Н. и др. Энергетическое обследование несинусоидальных режимов многопроводных линий электропередачи. – Электричество, 2011, № 12, с. 12–15.

13. Боровиков В.С., Харлов Н.Н., Акимжанов Т.Б. О необходимости включения добавочных потерь от высших гармоник тока в технологические потери при передаче электрической энергии. – Известия Томского политехнического университета, 2013, т. 322, № 4, с. 91–93.

14. Боровиков В.С. и др. Опыт корпоративного обследования электрических сетей 110 кВ Сибири: монография. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010, 228 с.

15. Коверникова Л.И. Оценка дополнительных потерь активной мощности в воздушных ЛЭП 110 кВ при несинусоидальных режимах. – Электричество, 2024, № 6, с. 16–26.

16. Демирчян К.С. и др. Теоретические основы электротехники. Т. 3. СПб.: Питер, 2003, 377 с.

17. Payne A. Skin Effect, Proximity Effect and the Resistance of Circular and Rectangular Conductors, 2021, 41 p.

18. Ramo S., Whinnery J.R., Van Duzer T. Fields and Waves in Communication Electronics. Third Edition. Hoboken: John Wiley & Sons, 1994, 864 p.

19. Карташев И.И., Зуев Э.Н. Качество электроэнергии в системах электроснабжения. Способы его контроля и обеспечения. М.: Изд-во МЭИ, 2001, 120 с.

20. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. М.: Энергоатомиздат, 1994, 272 с.

21. Манусов В.З., Хрипков В.В., Фролова В.В. Сравнительный анализ математических моделей для определения коэффициента увеличения активного сопротивления проводников от высших гармоник. – Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока, 2018, № 1, с. 184–188.

22. ГОСТ Р МЭК 60287-1-1-2022. Кабели электрические. Расчет номинальной токовой нагрузки. М.: Российский институт стандартизации, 2022, 26 с.

23. Kennelly A.E., Laws F.A., Pierce P.H. Experimental Researches on Skin Effects in Conductors. – Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1915, vol. 34, No. 2, pp. 1953–2021, DOI: 10.1109/T-AIEE.1915.4765283.

24. Monteiro J.H.A. et al. Simplified Skin-Effect Formulation for Power Transmission Lines. – IET Science, Measurement & Technology, 2014, vol. 8, No. 2, pp. 47–53, DOI: 10.1049/iet-smt.2013.0072.

25. Сухичев М.И., Скочко Е.М. К вопросу о необходимости учета скин-эффекта для сталеалюминиевых проводов. – Промышленная энергетика, 2023, № 1, с. 2–8.

26. Рукавишников В.А., Мосолапов А.О. Векторный метод конечных элементов для одной задачи электромагнетизма с сильной сингулярностью. – Доклады академии наук, 2013, т. 449, № 2, с. 144–148.

Поступила в редакцию [13.01.2025]

Принята к публикации [30.01.2025]

Авторы:



**Манусов Вадим Зиновьевич** – доктор техн. наук, профессор, профессор Политехнической школы, Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск, Россия; Manusov36@mail.ru



**Белосветов Антон Витальевич** – аспирант кафедры «Электрооборудование и автоматика», Сибирский государственный университет водного транспорта, Новосибирск, Россия; belosvetov-anton@mail.ru

# Mathematical Modeling of the Skin Effect in ACSR Wires

**MANUSOV Vadim Z.** (Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russia) – Professor of the Physics and Mathematics School, Dr. Sci. (Eng.), Professor.

**BELOSVETOV Anton V.** (Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk, Russia) – Postgraduate Student of the Electrical Equipment and Automation Dept.

*In overhead power lines made of aluminum conductor steel reinforced (ACSR) wires, part of active power loss is due to the higher harmonic current components. This is manifested in that the current sinusoidal waveform is distorted, and the current is displaced to the conductor surface with increasing the frequency (a skin effect). At the same time, increasing the frequency in electrical and autonomous power supply systems (for example, up to 400 or 800 Hz) is advisable for the possibility to achieve significantly smaller weight and overall dimensions of the equipment, especially for mobile facilities. The article presents mathematical models and the results of finite element modeling carried out taking into account the influence of temperature on the resistance growth coefficients caused by the skin effect. A comparative analysis was carried out, which has shown the possibility of using an analytical method for determining the resistance of ACSR wires with taking into account the higher harmonic current components. Two methods for obtaining analytical characteristics of the skin effect coefficients in the power line wires are considered. It is shown that a stranded wire can be considered as an "equivalent" homogeneous (single core) wire if the steel content does not exceed 25 % of the wire total volume.*

**Key words:** power line, resistance, skin effect, higher harmonic components, power loss

*The research was conducted using the ELCUT professional software provided by Tor LLC, St. Petersburg.*

## REFERENCES

1. Shandrygin D.A. et al. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – in Russ. (Bulletin of Irkutsk State Technical University)*, 2020, vol. 24, No. 2, pp. 396–407.
2. Ashraf N. et al. Power Quality Analysis of the Output Voltage of AC Voltage and Frequency Controllers Realized with Various Voltage Control Techniques. – *Applied Sciences*, 2021, vol. 11, iss. 2, DOI: 10.3390/app11020538.
3. Dutta N., Kaliannan P., Subramaniam U. Experimental Analysis of PQ Parameter Estimation of VFD Drives. – *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 937, DOI: 10.1088/1757-899X/937/1/012042.
4. Jyothi R. et al. IoT Application for Real-Time Condition Monitoring of voltage Source Inverter Driven Induction Motor. – *Innovative Data Communication Technologies and Application*, 2021, vol. 59, pp. 97–105, DOI: 10.1007/978-981-15-9651-3\_8.
5. Hu H. et al. Overview of Harmonic and Resonance in Railway Electrification Systems. – *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2018, vol. 54, No. 5, pp. 5227–5245, DOI: 10.1109/TIA.2018.2813967.
6. Levačić G., Župan A., Čurin M. An Overview of Harmonics in Power Transmission Networks. – *First International Colloquium on Smart Grid Metrology (SmaGriMet)*, 2018, DOI: 10.23919/SMAG-RIMET.2018.8369828.
7. Arrilaga Dzh., Bredli D., Bodzher P. *Garmoniki v elektri-cheskikh sistemah* (Power Systems Harmonics). M.: Energoatomizdat, 1990, 320 p.
8. GOST 32144-2013. *Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemah elektrosnabzheniya obshchego naznache-niya* (Electrical Energy. Electromagnetic Compatibility of Technical Means. Standards of Quality of Electric Energy in General Purpose Power Supply Systems). M.: Standartinform, 2014, 16 p.
9. Silvério E.T., Macedo Junior J.R. Measuring and Modeling the Skin Effect for Harmonic Power Flow Studies. – *Energies*, 2023, vol. 16, DOI: 10.3390/en16237913.
10. Zhang X.-P., Yan Z. Energy Quality: A Definition. – *IEEE Open Access Journal of Power and Energy*, 2020, vol. 7, pp. 430–440, DOI: 10.1109/OAJPE.2020.3029767.
11. Product data Bulletin No. 8803PD9402. Causes and Effects of Variable Frequency Drives Relative to the IEEE 519-1992 Standard. Raleigh, U.S.A.: SQUARE D, 1994, 8 p.
12. Harlov N.N. et al. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2011, No. 12, pp. 12–15.
13. Borovikov V.S., Harlov N.N., Akimzhanov T.B. *Izvestiya Tomskogo politehnicheskogo universiteta – in Russ. (Proceedings of Tomsk Polytechnic University)*, 2013, vol. 322, No. 4, pp. 91–93.
14. Borovikov V.S. et al. *Opyt korporativnogo obsledovaniya elektricheskikh setey 110 kV Sibiri: monografiya* (The Experience of Corporate Inspection of 110 kV Electric Networks in Siberia: a Monograph). Tomsk: Izd-vo Tomskogo politehnicheskogo universiteta, 2010, 228 p.
15. Kovernikova L.I. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2024, No. 6, p. 16–26.
16. Demirchyan K.S. et al. *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki* (Theoretical Foundations of Electrical Engineering). Vol. 3. SPb.: Piter, 2003, 377 p.
17. Payne A. Skin Effect, Proximity Effect and the Resistance of Circular and Rectangular Conductors, 2021, 41 p.
18. Ramo S., Whinnery J.R., Van Duzer T. *Fields and Waves in Communication Electronics*. Third Edition. Hoboken: John Wiley & Sons, 1994, 864 p.
19. Kartashev I.I., Zuev E.N. *Kachestvo elektroenergii v sistemah elektrosnabzheniya. Sposoby ego kontrolya i obespecheniya* (The Quality of Electricity in Power Supply Systems. Ways to Control and Ensure it). M.: Izd-vo MEI, 2001, 120 p.
20. Zhezhelenko I.V. *Vysshie garmoniki v sistemah elektrosnabzheniya prompredpriyatii* (Higher Harmonics in Industrial Power Supply Systems). M.: Energoatomizdat, 1994, 272 p.



21. **Manusov V.Z., Hripkov V.V., Frolova V.V.** *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka – in Russ. (Scientific Problems of Transport in Siberia and the Far East)*, 2018, No. 1, pp. 184–188.
22. **GOST R IEC 60287-1-1-2022.** *Kabeli elektricheskie. Raschet nominal'noi tokovoi nagruzki* (Electric Cables. Calculation of the Current Rating) M.: Rossiyskiy institut standartizatsii, 2022, 26 p
23. **Kennelly A.E., Laws F.A., Pierce P.H.** Experimental Researches on Skin Effects in Conductors. – Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1915, vol. 34, No. 2, pp. 1953–2021, DOI: 10.1109/T-AIEE.1915.4765283.
24. **Monteiro J.H.A. et al.** Simplified Skin-Effect Formulation for Power Transmission Lines. – IET Science, Measurement & Technology, 2014, vol. 8, No. 2, pp. 47–53, DOI: 10.1049/iet-smt.2013.0072.
25. **Suhichev M.I., Skochko E.M.** *Promyshlennaya energetika – in Russ. (Industrial Energy)*, 2023, No. 1, pp. 2–8.
26. **Rukavishnikov V.A., Mosolapov A.O.** *Doklady akademii nauk – in Russ. (Reports of the Academy of Sciences)*, 2013, vol. 449, No. 2, pp. 144–148.

Received [13.01.2025]

Accepted [30.01.2025]