

К. Р. МАЛАН

К РАСЧЕТУ АКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СТАЛЕАЛЮМИНИЕВЫХ ПРОВОДОВ НА ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЕ

При видоизмененном проектировании современных мощных линий электропередачи использованием широкого сортаментов сталеалюминиевых проводов необходимо определить электрические параметры проводов с большей степенью точности, чем это делалось до сих пор. В то же время из-за сложности конструкции, соответствующих картины распределения электрического и магнитного полей и теле привода, активное и реактивное сопротивления не поддаются строгому теоретическому расчету. Недостаточно и bisher имеющихся экспериментальных исследований различных характеристик проводов.

В настоящей статье приводится анализ влияния основных конструктивных факторов на параметры проводов, в частности на активное сопротивление, а также предлагаются рекомендации по его расчету, основанные на анализе полученных результатов и критическом рассмотрении некоторых предложенных методов [1, 2, 3] применительно к существующим ныне типам проводов. При этом, вполне понятно, необходимо было в силу этих методов расчета, в связи с чем результаты прежних исследований рассматривались в статье достаточно подробно.

Для однополюсных проводов обстоятельная методика расчета параметров была разработана в [1]. При этом использовалась конкретная либо универсальная кривая зависимости $\alpha(f)$. Эта методика может быть применена при использовании универсальной кривой (рис. 1) и для проводов, выпускаемых в настоящее время, в качестве приближенного способа, что подтверждается результатами таких расчетов. Следует однако заметить, что погрешность расчета при больших значениях тока (250 — 300 а) достигает 10 — 12%.

Для проводов с двумя и тремя слоями надежная методика расчета отсутствует. В [1] относительно двухполюсных проводов отмечается, что их расчет при токе промышленной частоты можно вести как на постоянном токе. В настоящее время такую методику, приемлемую в качестве приближенного способа, необходимо уже уточнить. Трехполюсные провода в [1] не рассматривались, так как лишь дальнейшее развитие энергетики привело к их появлению. В данное время на повестке дня стоит уже вопрос применения в линиях передачи четырехполюсных проводов, а также расширенных проводов, предлагаемых в [4, 5]. Другой же методики расчета, кроме рассмотренной, и отечествен-

ной практике до сих пор не предложено, что связано с большими трудностями учета физических процессов в проводах.

Анализ имеющихся зарубежных работ [2, 3] также показывает всю сложность исследуемых явлений. Даже тщательно поставленных опытах [2] невозможно выделить влияние отдельных факторов (в частности, перетока между алюминиевыми проволоками) из совокупности



Рис. 1.

всех явлений, и связи с чем в [2, 3] даются различные поправочные коэффициенты, опытные зависимости ряда вспомогательных величин для расчета и т. д. Необходимо указать, что эти работы относятся к сортаменту зарубежных проводов и предлагаемые кривые и коэффициенты основаны на результатах исследований этих проводов, причем, в основном на частоте 60 Гц. Поэтому предложенные в зарубежных работах методы не могли быть непосредственно использованы для расчета параметров, а поскольку отсутствовала их проверка применительно к отечественным проводам, то эти методы расчета не получили у нас распространения. Проверка же могла быть осуществлена лишь при наличии опытных данных.

По просьбе проектных организаций и лаборатории ТОЭ АПИ им. М. И. Калинина нами были получены опытные значения параметров для основных типов проводов, применяемых в настоящее время в мощных линиях передач, и представлены [8] в виде специальных таблиц в зависимости от тока.

В табл. 1 сопоставлены полученные нами экспериментальные значения параметров, принятые за исходные, с их расчетными значениями по различным методам [1, 2, 3]. Необходимо иметь в виду, что основой расчета во всех рассматриваемых методах являются экспериментально полученные зависимости для конкретных конструкций проводов. Поэтому в некоторых случаях, из-за отсутствия возможности пересче-

та указанными методами параметров исследованных нами проводов, приводятся данные погрешностей из самих источников [2, 3], представленные в табл. 1 курсивом.

Анализ физических предпосылок, заложенных в расчетные методы [1, 2], показал, что наличие продольного потока учитывается лишь для однополюсных проводов, представляющих собой соленоид со стальным сердечником. Для двух- и трехполюсных проводов этим явлением либо пренебрегается [1, 2], что приводит к заниженным результатам, особенно для трехполюсных проводов, либо оно участвует в расчете [3] с предварительно снятой опытной кривой $\gamma(I)$ для конкретного прохода. При этом поверхностный эффект в проводах учитывается по известным формулам для трубчатых проводников, полученным Двайтом [6] и преобразованным затем Арнольдом [7] для удобства численных расчетов. Для однополюсных же проводов поверхностным эффектом пренебрегают. Необходимость дополнительного исследования основных факторов, влияющих на электрические параметры, в частности на активное сопротивление, для создания инженерной системы расчета очевидна. В связи с чем, кроме получения опытных данных, необходимых проектной организацией, в последующем были проведены специальные аналитические и опытные исследования с тем, чтобы попытаться обосновать расчетную методику.

Таблица 1

Авторы расчетных методов, год опубликования	Типы сталесплавынных проводов					
	Однополюсные		Двухполюсные		Трехполюсные	
	r	$\gamma_{\text{поверх}}$	r	$\gamma_{\text{поверх}}$	r	$\gamma_{\text{поверх}}$
Нейман А. Р., Заблудов Н. А. [1], 1934	до 10–12%	до 10–15%	1–2%	10–12%	—	—
Lewis W. A., Tuttle P. D. [2], 1958	3–5%	3%	1–2%	3%	до 8–10%	3%
Morgan V. T. [3], 1967	—	—	1–2%	2–3%	1–2%	до 10–15%

Как видно из приведенных в [8] данных, а также существующих работ, в частности [1, 3], характерным является определенный максимум в зависимости от тока для кривой коэффициента добавочных потерь $k_{\text{д}}$, равного величине отношения активного сопротивления к сопротивлению постоянному току при соответствующей установившейся температуре. Нелинейный характер коэффициента $k_{\text{д}}$ в проводах от тока объясняется, по-видимому, потерями в стали от продольного магнитного потока. Аналогичное явление имеет место и для внутренней индуктивности.

Для обоснования данного предположения воспользуемся опытными результатами, полученными Морганом [3], который снял характеристики двухпроводного провода с конструкцией $7 \cdot 0,279 + (12 + 18) \cdot 0,279$ и трехпроводного провода с конструкцией $7 \cdot 0,317 + (12 + 18 + 24) \cdot 0,317$. Если напряженность продольного магнитного поля внутри провода представить в виде алгебраической суммы м. д. с. на единицу длины от токов в алюминиевых повивах, то по конструктивным данным проводов, исследованных Морганом [3], в предположении равномерного распределения тока, то есть пропорционально сечениям повивов, расчет дает:

для двухпроводного провода

$$H_{II} = I_2 w_2 - I_1 w_1 = \frac{18}{30} I \cdot 5,2 - \frac{12}{30} I \cdot 5,6 = 1,56 I \text{ а м};$$

для трехпроводного провода

$$H_{III} = I_2 w_2 - I_1 w_1 + I_3 w_3 = \frac{24}{54} I \cdot 3,5 - \frac{18}{54} I \cdot 3,5 + \frac{12}{54} I \cdot 4,25 = 1,34 I \text{ а м},$$

где индексы при токах I в алюминиевых повивах и числах шагов повивов w на единицу длины отсчитываются от внутреннего повива, примыкающего к стальной сердцевине; при этом I без индекса — полный ток в проводе (ток в сердечнике пренебрегается).

Максимальный ток, после которого коэффициент добавочных потерь $k_{доб} = \frac{r}{r_{eff}}$ стал уменьшаться, при эксперименте был равен:

для двухпроводного провода 700 а, для трехпроводного — 1200 а; подставив их в записанные выше расчетные выражения напряженности продольного поля, получим $H_{II \text{ макс}} = 1100 \text{ а м}$ и $H_{III \text{ макс}} = 1600 \text{ а м}$, что соответствует интервалу значений H для максимума кривых магнитной проницаемости материалов данных проводов, приведенных в [3]. По данным других работ [1, 2] величина магнитной проницаемости сердечника также достигает наибольшего значения примерно при тех же значениях напряженности магнитного поля $H = 900 - 1600 \text{ а м}$.

Аналогичный расчет, проведенный для наших конструкций проводов, подтверждает предположение о совпадении максимума кривой добавочных потерь с максимумом магнитной проницаемости сердечника провода для однопроводного провода, для других же проводов максимум потерь оказался несколько ниже.

Таким образом, имеющиеся опытные зависимости и расчеты показывают, что влияние продольного потока необходимо учитывать при расчете электрических параметров не только для однопроводных, но трех- и двухпроводных проводов. В то же время при расчете следует учитывать поверхностный эффект, особенно для проводов с большим радиусом сечения.

Для подтверждения этого положения и приближенной опытной оценки коэффициента поверхностного эффекта нами была снята зависимость параметров трехпроводного провода АСО-700 от величины

тока при одной и той же температуре $t = 28^\circ \text{C}$ (табл. 2). Постоянство температуры обеспечивалось быстрым проведением опыта, при этом провод был уже предварительно нагрет до указанного установившегося значения.

Таблица 2

I	$H_{\text{вн}} \text{ а.м.}$	r	$\alpha_{\text{внутри}}$	$L_{\text{внутри}}$	$k_{\text{доб}} = \frac{r}{r_{\text{вн}}}$
a	$a \text{ м.}$	10^{-4} ом. м.		10^{-3} м. м.	
300	270	0,430	0,150	4,78	1,047
400	368	0,431	0,151	4,80	1,048
500	460	0,432	0,153	4,87	1,051
600	552	0,433	0,154	4,90	1,054
750	690	0,434	0,155	4,93	1,056
800	736	0,435	0,156	4,96	1,058

Примечание: $r_{\text{вн}} = 0,411 \cdot 10^{-4} \text{ ом. м.}$

Из табл. 2 видно, что увеличение тока вызывает соответствующее увеличение коэффициента добавочных потерь, которое в основном обусловлено действием продольного потока. Если теперь определить

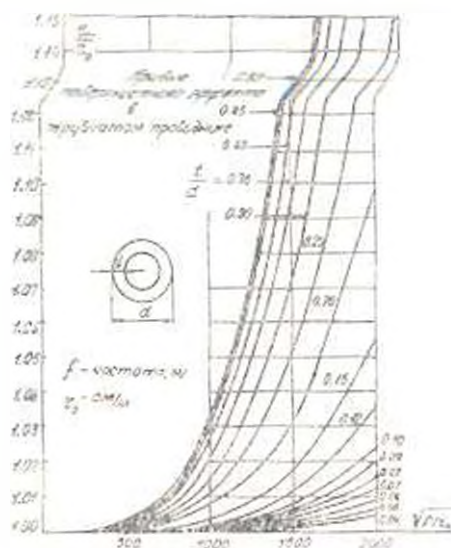


Рис. 2.

напряженности продольного магнитного поля внутри провода АСО-700 по наложенному выше способу:

$$H_{\text{вн}} = I_1 \alpha_1 + I_2 \alpha_2 + I_3 \alpha_3 = \frac{24}{24} I \cdot 2,44 + \frac{18}{54} I \cdot 2,44 + \frac{12}{54} I \cdot 2,93 = 0,92 I$$

и построить зависимость $\frac{r}{r_{\text{вн}}} = f(H)$, то из ней можно заметить, что

данная функция в указанном промежутке подчиняется линейному закону. Продолжив кривую до пересечения с осью ординат, получим полуэмпирическое значение коэффициента поверхностного эффекта провода АСО-700 $k_{\text{пов}} = 1,041$, которое хорошо согласуется с соответствующей расчетной величиной $k_{\text{пов}} = 1,036$ по кривым Двайта, представленным на рис. 2.

Следует заметить, что по некоторым опытам и анализу, имеющемуся в литературе [9, 11], коэффициент поверхностного эффекта для многопроволочных проводов очень близок коэффициенту поверхностного эффекта для сплошного проводника с таким же внутренним и внешним диаметром, если они имеют одинаковое сопротивление постоянному току. Поэтому для сталелитейных проводов коэффициент поверхностного эффекта приблизительно может быть взят равным коэффициенту сплошной трубы, имеющей внутренний диаметр, равный диаметру окружности, которая может быть вписана внутрь нижнего слоя алюминиевых проволок, а внешний диаметр должен быть равен диаметру окружности, описывающей наружный слой алюминиевых проволок.

Таким образом, проведенные исследования позволили оценить имеющиеся расчетные методы определения параметров применительно к отечественным проводам, что показано в табл. 1. При этом как следует из анализа работ [1, 2, 3], в настоящее время нельзя указать достаточно точных и широко проверенных на практике методов расчета активного и внутреннего реактивного сопротивлений сталелитейных проводов. Поэтому в работе [8] были представлены полученные нами экспериментальные значения параметров в зависимости от тока для различных наиболее распространенных типов проводов и занесены в специальные таблицы. Такое же направление для определения параметров существует и в США [2]. В то же время опыты выявили и подтверждали ряд факторов, влияющих на параметры проводов, которые дают возможность с учетом прежних исследований провести их приближенный расчет.

Анализ работ [1, 2, 3] и наши исследования показали, что наиболее верный расчет активного сопротивления для всех проводов с различным числом поясков должен производиться на базе учета как потерь в стали от продольного потока, так и поверхностного эффекта по сечению провода.

Для точного определения потерь в стали необходимо иметь конкретную зависимость кривой магнитной проницаемости материала сердечника от напряженности продольного магнитного поля. В случае ее отсутствия потери можно приблизительно вычислить по универсальной кривой [1], приведенной на рис. 1, а напряженность поля как указано выше. Необходимо отметить, что действующая регламентация шага скрутки в ГОСТ 839—59, приводящая на практике к заметным отклонениям от предельных значений, и отсутствие каких-либо указаний о шаге скрутки в промежуточных появках представляют определенные затруднения

при разработке общих методов расчета активного сопротивления сталелюминиевых проводов.

Поверхностный эффект целесообразно определять по специальным кривым, представленным на рис. 2, которые пересчитаны [2] для наиболее важной для линий электропередач области значений $k_{\text{поп}}$ (1,0—1,15) и в настоящей работе приведены в системе СИ.

При необходимости поправки на эффект близости, например, для двухпроводной линии, ее можно подсчитать, принимая провода трубчатыми, по формулам Арнольда, которые приведены в [7]. Внутреннее реактивное сопротивление рекомендуется считать в области до максимума кривой $\mu(H)$ по Моргану [3].

В качестве примера рассмотрим приближенный расчет активного сопротивления трехпроводного провода АСО-700, конструктивные данные которого следующие: $S_T (1 + 6 + 12) \cdot 2,5 + A_L (12 + 18 + 24) \times 4,1$; $d = 37,1$ мм; $w_0 = w_1 = 2,44$ витка/м; $w_1 = 2,93$ витка/м; $r_0 = 0,398 \cdot 10^{-1}$ ом/м.

Как следует из изложенного выше, активное сопротивление любого провода можно представить в виде

$$r_{\text{пол}} = k_{\text{поп}} \cdot r_0 + \Delta r_{\text{прот}},$$

где $k_{\text{поп}}$ — коэффициент поверхностного эффекта;

$\Delta r_{\text{прот}}$ — вносимое активное сопротивление, обусловленное потерями в стали от продольного потока.

Для рассчитываемого провода АСО-700 $k_{\text{поп}}$ найдется по рис. 2 как функция от координаты $\sqrt{\frac{f}{r_0}} = \sqrt{\frac{50}{0,398 \cdot 10^{-1}}} = 1120$. Определив величину, характеризующую отношение геометрических размеров сечения провода, которое в данном случае равно $\frac{t}{d} = \frac{12,3}{37,1} = 0,33$, по этому значению из кривой рис. 2 найдем $k_{\text{поп}} = 1,036$.

Вносимое активное сопротивление от продольного потока будем определять для всех проводов как

$$\Delta r_{\text{прот}} = x_{\text{прот}} \cdot \lg 2 = \omega L_{\text{прот}} \lg 2,$$

где ψ — угол потерь и равен углу сдвига фаз между потоком $\Phi(B)$ и током $I(H)$.

Учитывая, что индуктивность $L_{\text{прот}}$, обусловленную продольным потоком, можно выразить в следующем виде:

$$L_{\text{прот}} = \frac{\Psi_{\text{прот}}}{I} = \frac{\Phi_{\text{прот}} w}{I} = \frac{\mu H_{\text{прот}} S_{\text{ст}} w}{I} = \frac{\mu I w^2 S_{\text{ст}}}{I} = \mu w^2 S_{\text{ст}},$$

окончательно для Δr имеем:

$$\Delta r_{\text{прот}} = 314 \cdot 4 \pi \cdot 10^{-7} w^2 S_{\text{ст}} \mu \cdot \lg 2 \text{ [ом/м]}.$$

В этом выражении неизвестные w и $s_{ст}$ определяются из конструктивных данных провода, а μ_r и $\operatorname{tg} \psi$ — по универсальной кривой (рис. 1).

Определив для АСО-700 $H_{расч}$ по изложенному в статье приближенному способу, эквивалентное значение w найдем из выражения

$$w = \frac{H_{расч}}{I} = \frac{I_2 w_2}{I} + \frac{I_1 w_1}{I} = \\ = \frac{24}{54} \cdot 2,44 + \frac{18}{54} \cdot 2,44 + \frac{12}{54} \cdot 2,93 = 0,92.$$

Сечение стали для данного провода равно:

$$s_{ст} = n_{ст} \frac{\pi d_{ст}^2}{4} = 19 \frac{\pi \cdot 2,5^2 \cdot 10^{-6}}{4} = 9,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

Подставив численные значения w^2 и $s_{ст}$, получим для $\Delta r_{расч}$ следующее выражение

$$\Delta r_{расч} = 0,314 \cdot 10^{-7} \mu_r \operatorname{tg} \psi.$$

Далее для определенного значения тока из расчетного выражения напряженности магнитного поля находим по кривой рис. 1 соответствующие значения μ_r и ψ ($\operatorname{tg} \psi$).

Найденные таким образом величины $r_{расч}$ для различных значений тока будут представлять активное сопротивление при 20 С и не учитывают зависимости от температуры, которую в случае необходимости можно принять линейной [3].

Коэффициент добавочных потерь определится как $k_{доб} = \frac{r_{расч}}{r_0}$.

Данные проведенного расчета и опыта для активного сопротивления коэффициента добавочных потерь провода АСО-700 представлены в табл. 3.

Таблица 3

I	$H_{расч}$	μ_r	ψ	$\operatorname{tg} \psi$	$\mu_r \operatorname{tg} \psi$	$\Delta r_{расч}$	$r_{расч}$	$k_{доб \text{ расч}}$	$k_{доб \text{ опыт}}$
a	$a, \text{ м}$		град			10^{-7} ом м			
200	92	60	8,0	0,140	8,4	0,0024	0,4147	1,040	1,050
300	184	65	9,5	0,167	10,8	0,0031	0,4157	1,045	1,055
400	276	70	12,0	0,213	14,9	0,0047	0,4170	1,050	1,060
500	368	90	15,0	0,268	24,1	0,0076	0,4198	1,055	1,070
600	460	110	18,5	0,335	36,9	0,0116	0,4239	1,065	1,065
700	550	150	25,0	0,466	70,0	0,0220	0,4343	1,085	1,060

Из сравнения расчетных и опытных величин можно отметить для указанного приближенного расчета вполне достаточную для практики точность и рекомендовать его для применения.

Ереванский политехнический институт

им. К. Маркса

Поступило 24.IV.1970.

Կ. Թ. ՄԱԼԻՆԱՆ

ՊՈԳՊՈՏԱՍԿՈՒԹՅՆ ԶԱՂՈՐԴԱԿՐԵՐԻ ԱԿՏԻՎ ԿՈՄՍԵՐՈՒԹՅԱՆ ԶԱՇՎՈՒՄԸ
ԱՐԴՅՈՆԱՐԵՐԱԿԱՆ ԶԱՃԱՆՈՒԹՅԱՆ ԿԵԳՔՈՒՄ

Ա Վ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Պողպատաալյումինե հաղորդարների էլեկտրական պարամետրների վրա հիմնական կոնստրուկտիվ գործոնների ազդեցության վերլուծության հիման վրա ցույց է տրված, որ տեղախ փախալիների թվից ակտիվ գիմպրոթյան ինժեներական հաշվարկը պետք է կատարվի հաշվի առնելով ինչպես երկաշնական հոսանքներից պողպատի մեջ առաջացող կորուստները, այնպես էլ հաղորդարի հատվածքում առաջացող մակերևութային էֆեկտը:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Нейман А. Р., Зангев И. А. Электрические параметры сталеалюминиевых проводов. „Электричество“, 1935, № 19.
2. Lewis W. A., Tuttle P. D. The Resistance and Reactance of Aluminium Conductors, Steel Reinforced (ACSR). Power Apparatus and Systems, 1959, № 10.
3. Morgan V. T. Electrical Characteristics of Steel-cored Aluminium Conductors. Proc. Inst. Electr. Engrs. Power Record, 1965, vol. 112, № 2.
4. Сыромятников И. А. Об экономическом применении расширенных (увеличенного диаметра) проводов на линиях электропередач высокого напряжения. „Электричество“, 1963, № 9.
5. Александров Г. Н., Крылов С. В. Провода для линий электропередачи сверхвысокого напряжения. „Электрические станции“, 1969, № 3.
6. Dwight H. B. Electrical Coils and Conductors. Mc. Graw-Hill Book Company, New York, 1945.
7. Arnold A. H. M. The Alternating-current Resistance of parallel Conductors of Circular Cross-section. IEEF, 1935, vol. 77.
8. Кузнецов И. Ф., Казан В. Г., Малин К. Р. Электрические параметры сталеалюминиевых проводов на промышленной и высоких частотах. „Известия АН СССР Энергетика и транспорт“, 1968, № 3.
9. Dwight H. B. Reactance of Stranded Conductors. Electrical World, New York, 1913, vol. 61, Apr.
10. Zuberky J. Skin and Spiraling Effect in Stranded Conductors. AIEE Transactions, pt. III, 1935, vol. 72.