

14. Временные руководящие указания по определению электрических нагрузок промышленных предприятий: Минэнерго СССР. [Текст] – М.: Госэнергоиздат, 1961. – 97 с. – (Нормативный документ Минэнерго СССР).

15. Указания по определению электрических нагрузок в промышленных установках // Инструктивные указания по проектированию электротехнических промышленных установок: Минэнерго СССР. [Текст] – М.: Госэнергоиздат, 1968. – №6. – С. 3-17. – (Нормативный документ Минэнерго СССР).

16. Инструкция по проектированию электроустановок угольных шахт, разрезов и обогатительных фабрик. [Текст] – М.: Минтопэнерго РФ, 1993. – 114 с. – (Нормативный документ Минтопэнерго РФ).

*Рекомендовано до друку проф. Разумним Ю.Т.*

УДК 621.316.11

**Ф.П. Шкрабец, д-р техн. наук, П.Ю. Красовский**  
(Украина, г. Днепрпетровск, Государственное ВУЗ "НГУ")

## **ХАРАКТЕР ИЗМЕНЕНИЯ НАГРУЗОЧНЫХ ПОТЕРЬ В ВОЗДУШНЫХ ЛЭП ПРИ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

### **Постановка задачи**

На фоне происходящих в Украине изменений хозяйственного механизма в энергетике, экономических отношений проблема снижения потерь электроэнергии в электрических сетях не только не утратила своей актуальности, но и выдвинулась в одну из задач обеспечения финансовой стабильности энерго-снабжающих организаций.

Опыт эксплуатации энергосистем показывает, что при длительной эксплуатации воздушных линий электропередач потери мощности и электроэнергии в них даже при неизменной нагрузке возрастают. Одна из причин – изменение конфигурации отдельных участков ЛЭП и, в связи с этим, изменения значенний эквивалентных сопротивлений. Из основных возможных причин изменения продольных сопротивлений ЛЭП можно отметить:

- уменьшение поперечного сечения и увеличение длины проводов, обусловленного их остаточной деформацией вследствие действия ветровых, гололедных и других нагрузок;
- коррозия проводов ЛЭП при влиянии на них разных климатических факторов (в том числе кислотных дождей, влажности, повышенной температуры, солнечной радиации) также приводит к снижению их активного поперечного сечения;
- увеличение удельного сопротивления материала проводов ЛЭП, вызванное изменением их структуры (старением) и остаточной деформацией („наклепом“).

В свою очередь технические потери электроэнергии при ее транспортировке в распределительных сетях являются основой норматива, определяющего экономически обоснованный технологический расход электроэнергии [1], поэтому точная оценка потерь электроэнергии обеспечивает корректное определение эффективности работы сетевого предприятия и планирование энергосберегающих мероприятий.

### **Цель статьи**

Представить результаты исследования влияния продолжительности и условий эксплуатации воздушных линий электропередачи на динамику технических электрических потерь при транспортировке электроэнергии.

### **Изложение основного материала**

В общем случае при неизменном токе нагрузочные потери активной мощности в трехфазной воздушной линии электропередачи определяются известным выражением [5]

$$\Delta P_{ВЛ} = 3I^2 R = 3I^2 \cdot \rho \cdot \frac{4 \cdot l}{\pi \cdot d^2} . \quad (1)$$

При продолжительной эксплуатации воздушных линий электропередачи коррозионный процесс приводит к уменьшению эффективного диаметра фазных проводов  $d$  и соответственно к увеличению значений активных сопротивлений проводов и нагрузочных потерь в линии согласно выражению (1). Следовательно, чтобы установить характер изменения нагрузочных потерь мощности и энергии в воздушных линиях электропередачи с нарастанием срока эксплуатации ЛЭП, необходимо знать характер изменения активного сопротивления фазных проводов ЛЭП от тех же причин.

Активное сопротивление фазных проводов воздушной ЛЭП, находящихся определенное время в эксплуатации, можно определить так:

$$R_k = R_{нач} + \Delta R_k, \quad (2)$$

где  $R_{нач}$  – начальное (паспортное) значение активного сопротивления новых фазных проводов воздушной ЛЭП;  $\Delta R_k$  – величина приращения активного сопротивления фазных проводов воздушной ЛЭП за время эксплуатации (действия коррозии).

Следовательно, величина приращения активного сопротивления фазных проводов за время эксплуатации воздушной ЛЭП

$$\Delta R_k = R_k - R_{нач}, \quad (3)$$

или согласно работе [4]

$$\Delta R_k = R_{нач}(k_k - 1). \quad (4)$$

Эта же величина приращения активного сопротивления фазных проводов, выраженная в относительных единицах,

$$\Delta R_{*k} = \frac{(R_k - R_{нач})}{R_{нач}} = k_k - 1. \quad (5)$$

С учетом работы [4]

$$\Delta R_{*k} = \frac{1}{(1 - \frac{\Delta d_0}{d_0} \cdot T_{экс})^2} - 1 = (1 - \frac{\Delta d_0}{d_0} \cdot T_{экс})^{-2} - 1. \quad (6)$$

Из последнего выражения видно, что величина приращения активного сопротивления фазных проводов воздушной ЛЭП, если считать значения диаметров проволок  $d_0$  фиксированными, зависит от продолжительности эксплуатации воздушной линии  $T_{экс}$  и степени зависимости изменения диаметра проволоки провода от коррозии за год  $\Delta d_0$ , т.е.

$$\Delta R_{*k} = f(T_{экс}, \Delta d_0). \quad (7)$$

Степень зависимости скорости атмосферной коррозии, т.е. степени изменения диаметра алюминиевых проволок и эффективного сечения от метеорологических факторов сложна, поскольку она изменяется во времени с суточной и сезонной периодичностью. Поэтому расчет ожидаемой степени коррозии металлов в различных климатических районах выполняют по усредненным значениям метеорологических параметров [1]. При разработке методов расчета коррозионных потерь при атмосферной коррозии использовались экспериментальные данные, полученные при испытаниях на станциях, расположенных в различных климатических зонах земного шара.

Рассмотрено несколько методов расчета степени коррозионных эффектов. Первый из них, наиболее простой, заключается в том, что степень коррозионного эффекта можно рассчитать по формуле

$$M = k_{ск} \cdot T_{экс}, \quad (8)$$

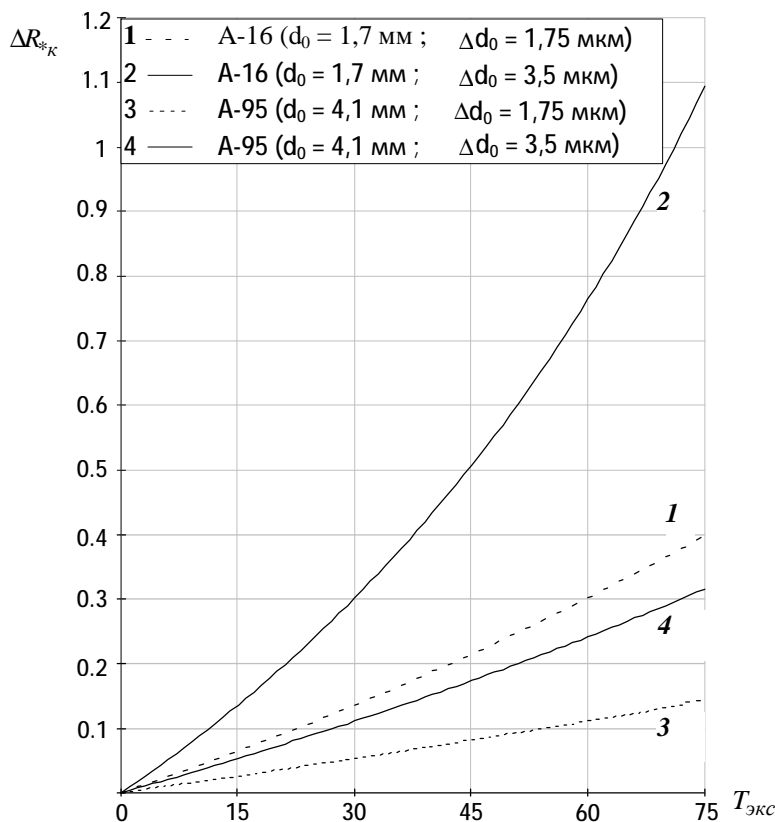
где  $M$  – степень коррозионного эффекта, зависящая от глубины проникновения коррозии или массы корродирующего металла на единицу поверхности, мкм или  $г/м^2$ ;  $k_{ск}$  – средняя скорость коррозии в условиях атмосферных испытаний, усредненная;  $T_{экс}$  – продолжительность предполагаемой эксплуатации металла в условиях, близких для проведения.

Согласно работе [2] в городской промышленной атмосфере скорость коррозии алюминия можно охарактеризовать значением 1 – 4 мкм/год (1967 г.). По данным анализа А.И. Голубева и М.Х. Кадырова приведенных в работе [2] скорость коррозии алюминия под влажной пленкой за период продолжительностью 100 ч составляет [мкм]: промышленная атмосфера (г. Москва) – 0,04; морская атмосфера – 0,11; сельская атмосфера (г. Звенигород) – 0,02, т.е. если предположить, что продолжительность увлажнения поверхности алюминия 100% или 8760 ч/год, тогда максимально возможная скорость коррозии для различных районов составит, мкм/год: промышленная атмосфера (г. Москва) – 3,5; морская атмосфера – 9,64; сельская атмосфера (г. Звенигород) – 1,75. По результатам исследований Ю.Н. Михайловского, со-

гласно работе [2], скорость коррозии алюминия составляет [г/м<sup>2</sup>-год]: промышленная атмосфера (г. Москва) – 0,45; сельская атмосфера (г. Звенигород) – 0,18, а по данным исследований 1967 г. Г.К. Беруштыса и Г.Б. Кларка приведенных в работе [2] скорость коррозии алюминия составляет [г/м<sup>2</sup>]: промышленная атмосфера – 3,8; сельская атмосфера – 0,25.

Анализ литературных источников [2, 3], а также с учетом того, что по прошествии более чем 50 лет концентрация загрязнений в атмосфере, влияющая на скорость коррозии, возросла в значительной степени, поэтому можно сделать вывод, что для условий Украины скорость коррозии алюминия находится в диапазоне 1,75 – 3,5 мкм/год.

Построены графики изменения относительного приращения активного сопротивления фазных проводов воздушной ЛЭП (рис. 1) согласно выражению (6) для двух проводов стандартных сечений, состоящих из соответствующего количества проволок минимального и максимального диаметров (таблица).



**Рис.1. Зависимость  $\Delta R_{*к} = f(T_{экс}, \Delta d_0)$  для проводов марки А-16 и А-95 при крайних значениях скорости коррозии**

Из рисунка видно, что продольное активное сопротивление фазных алюминиевых проводов, состоящих из проволок минимального стандартного диаметра (1,7 мм) за 30 лет эксплуатации может (при максимальной скорости коррозии) увеличиться на 30%, а за 70 лет – удвоится (100%). Для проводов с большим диаметром проволок степень возрастания продольного сопротивления уменьшается и для максимального диаметра проволок (4,1 мм) при той же скорости коррозии составит: за 30 лет эксплуатации 12%; за 70 лет – 26%.

На основании выражения (1) можно утверждать, что характер нагрузочных потерь активной мощности в воздушных линиях электропередачи в процессе их эксплуатации определяется путем изменения значений продольного активного сопротивления фазных алюминиевых проводов ЛЭП.

Таблица

**Физические характеристики стандартных проводов воздушных ЛЭП**

Номинальное сечение, мм <sup>2</sup>	Провода марок А и АКП		
	Число проволок	Номинальный диаметр проволок, мм	Число повивов
16	7	1,70	1
25	7	2,13	1
35	7	2,50	1
50	7	3,00	1
70	7	3,55	1
95	7	4,10	1
120	19	2,80	2
150	19	3,15	2
185	19	3,50	2
240	19	4,00	2
300	37	3,15	3

Следовательно, используя выражения (1) и (2), в общем случае можем записать

$$\Delta P_{ВЛ} = 3I^2 (R_{нач} + \Delta R_k) = 3I^2 R_{нач} + 3I^2 \Delta R_k, \quad (9)$$

т.е. нагрузочные потери в воздушных линиях состоят из двух составляющих: потерь, соответствующих паспортным характеристикам проводов ЛЭП  $\Delta P_{нач}$ , и величины приращения потерь  $\delta P_{экс}$ , обусловленной изменениями сопротивления проводов ЛЭП за срок эксплуатации, т.е.

$$\Delta P_{ВЛ} = \Delta P_{нач} + \delta P_{экс}. \quad (10)$$

Зависимость величины активных потерь мощности в воздушных линиях электропередачи от продолжительности эксплуатации ЛЭП и скорости коррозии алюминиевых проводов с учетом их начальной физической характеристики

$$\Delta P_{ВЛ} = f(T_{экс}, \Delta d_0, d_0) \quad (11)$$

получим, воспользовавшись выражениями (4), (6) и проведя необходимые преобразования,

$$\Delta P_{ВЛ} = 3I^2 R_{нач} \left(1 - \frac{\Delta d_0}{d_0} \cdot T_{экс}\right)^{-2}. \quad (12)$$

Представлены графические зависимости (рис. 2 и 3), иллюстрирующие степень и характер нарастания активных нагрузочных потерь мощности (в относительных единицах) в воздушных линиях электропередачи для алюминиевых проводов стандартных сечений при обоснованных ранее граничных скоростях атмосферной коррозии.

Анализ кривых показывает, что степень влияния коррозии возрастает с уменьшением диаметра проволок, формирующих фазный провод, и за 70 лет эксплуатации может удвоить нагрузочные потери.

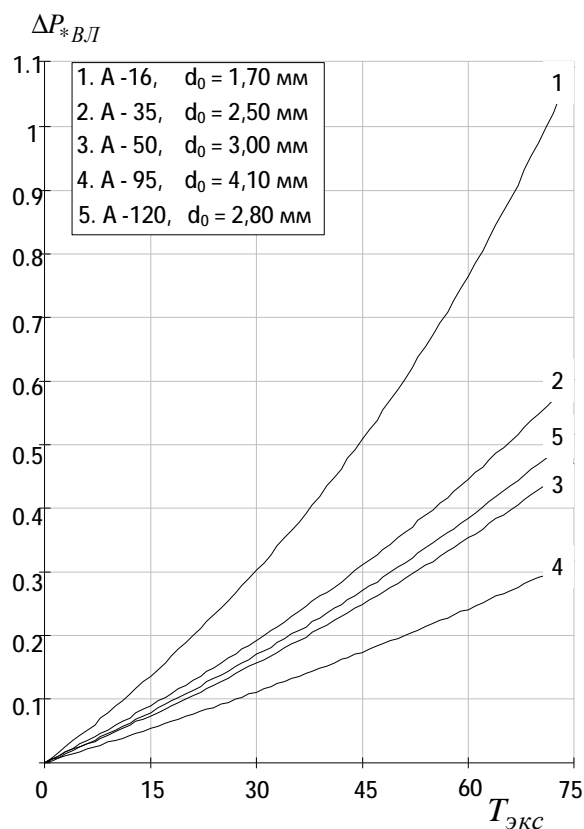


Рис.2. Характер изменения нагрузочных потерь в воздушных ЛЭП в процессе эксплуатации для  $Dd_0 = 3,5$  мкм/г

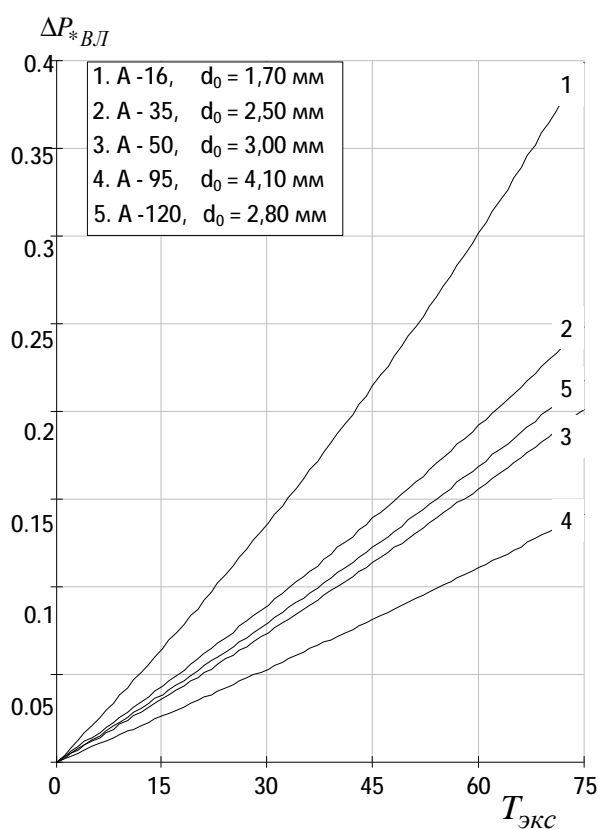


Рис.3. Характер изменения нагрузочных потерь в воздушных ЛЭП в процессе эксплуатации для  $Dd_0 = 1,75$  мкм/г

### **Выводы**

1. Атмосферная коррозия алюминиевых проводов воздушных линий приводит к уменьшению диаметра и эффективного сечения жилы провода, что в свою очередь влияет на значение продольного активного сопротивления ЛЭП, практически оставляя без изменения величину реактивного сопротивления линии электропередач.

2. Установлен закон изменения продольного активного сопротивления воздушных линий, в соответствии с которым величина приращения активного сопротивления проводов зависит от продолжительности эксплуатации воздушной линии, значений стандартных диаметров проволок, формирующих провод, и степени изменения диаметра проволоки провода в результате коррозии за один год (скорости коррозии).

3. Для условий Украины скорость коррозии алюминиевых проводов следует принимать в диапазоне 1,75 – 3,5 мкм/год (для сельских и городских районов). При этом продольное активное сопротивление фазных алюминиевых проводов, состоящих из проволок минимального стандартного диаметра (1,7 мм), за 30 лет эксплуатации может (при максимальной скорости коррозии) увеличиться на 30%, а за 70 лет – удвоиться (100%). Для проводов с максимальным диаметром проволок (4,1 мм) степень возрастания продольного сопротивления уменьшается и при той же скорости коррозии составит: за 30 лет эксплуатации 12%; за 70 лет – 26%.

### **Список литературы**

1. Воротницкий В.Э. Расчет, нормирование и снижение потерь электроэнергии в электрических сетях [Текст]: учеб.-метод. пособие / В.Э. Воротницкий, М.А. Калинкина. – 3-е изд. – М.: ИПК госслужбы, 2003. – 64 с.
2. Герасимов В.В. Коррозия алюминия и его сплавов / В.В. Герасимов. – М.: Металлургия, 1967 – 114 с.
3. Акимов Г.В. Основы учения о коррозии и защите металлов / Г.В. Акимов. – М.: гос. науч.-техн. изд. лит-ры по черной и цветной металлургии, 1946. – 463 с.
4. Шкрабец Ф.П. Влияние коррозии алюминия на электрические параметры ЛЭП / Ф.П. Шкрабец, П.Ю. Красовский // Гірн. електромеханіка та автоматика: наук.-техн. зб. – 2007. – Вип. 79. – С. 36-39.
5. Півняк Г.Г. Розрахунки електричних мереж систем електропостачання: навч. посіб. / Г.Г. Півняк., Г.А. Кігеля, Н.С. Волотковської; за ред. Г.Г. Півняка. – Вид. 2-е, перероб. і доп. – Д.: НГУ, 2002. – 219 с.

*Рекомендовано до друку проф. Куваевим Ю.В.*

УДК 629.423

*А.М. Муха, д-р техн. наук*

*(Україна, Дніпропетровськ, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна)*

### **ВПЛИВ ВИДУ ЕЛЕМЕНТНОЇ БАЗИ НА КОНСТРУКТИВНІ ПОКАЗНИКИ СТАТИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ**

**Вступ.** Сучасну тягову електропередачу неможливо уявити без статичних перетворювачів, які забезпечують необхідне перетворення електричної енергії від джерела (тягової підстанції) до вала тягового двигуна. Потужність тягових перетворювачів щороку зростає, це необхідно для забезпечення достатнього рівня потужності тягової електропередачі, особливо для швидкісного руху поїздів. Збільшення потужності тягової електропередачі, зокрема статичного перетворювача, при існуючих підходах до проектування електрообладнання вимагає збільшення його "життєвого" простору внаслідок збільшення потужності трансформаторно-реакторного обладнання та збільшення габаритів системи охолодження.

На шляху необхідного збільшення габаритів обладнання стає особливість тягового рухомого складу – обмеження доступного простору габаритами кузова електровоза.

Один зі шляхів зменшення габаритних розмірів електрообладнання статичного перетворювача – використання напівпровідникових приладів підвищеного класу точності та струму, що дозволяє підвищити одиничну потужність кожного з вентилів у складі схем та зменшити втрати потужності на напівпровідникових приладах.

Різні фірми-виробники пропонують власні схемні та технологічні рішення щодо використання різноманітної елементної бази та систем охолодження перетворювачів, які базуються на відпрацьованих технічних та технологічних рішеннях, вартості та інших об'єктивних та суб'єктивних факторах. Тому прийняти рішення, яку елементу базу та систему охолодження використовувати у складі тягової електропередачі електровоза, є досить складною науково-технічною проблемою.