УДК 621.3.018.3

А.А. АЛФЕРОВ, аспирант (ГГТУ)
Научные руководители: Н.В. ГРУНТОВИЧ, д.т.н., профессор (ГГТУ),
А.Ю. РУДЧЕНКО, к.т.н., доцент (ГГТУ)
г. Гомель

ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ СУЩЕСТВУЮЩИХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ, УЧИТЫВАЮЩИХ ВЛИЯНИЕ ВЫСШИХ ГАРМОНИК НА ЭКСПЛУАТАЦИЮ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ

Известно, что активное сопротивление жилы провода при прохождении по нему переменного тока больше, чем его сопротивление постоянному току, и потери при переменном токе больше, чем при постоянном токе такой же величины.

В литературе можно встретить различные методики учета поверхностного эффекта.

1. Наиболее часто в литературе [1, 2] можно встретить следующую методику учета поверхностного (краевого) эффекта.

Сопротивление жилы кабеля с учетом краевого эффекта предлагается рассчитывать по выражению

$$R_{Ж} = R \cdot (1 + y_{П}), \tag{1}$$

где R – сопротивление токопроводящей жилы постоянному току при максимально допустимой температуре; $y_П$ – коэффициент, учитывающий поверхностный эффект.

Значение $y_П$ предлагается рассчитывать по аналитической аппроксимации [1]

$$y_{П} = \frac{x^4}{192 + 0{,}8 \cdot x^4}, \tag{2}$$

или определять графически [4] в зависимости от параметра x, который в свою очередь определяется выражением

$$x = \sqrt{\frac{8 \cdot \pi \cdot f \cdot k}{R} \cdot 10^{-7}}, \tag{3}$$

где k – коэффициент, зависящий от конструкции токопроводящей жилы (для жил круглой и секторной формы k = 1).

В [1] указано, что выражение (1) дает достаточно точные значения при x < 2,8. Таким образом, например, для медной токопроводящей жилы сечением 400 мм^2 область применения выражений (1) – (3) ограничивается диапазоном частот от 0 до 170 Гц, т.е. третьей гармоникой. Этого явно не достаточно для анализа влияния высших гармоник, возникающих в электрических сетях на увеличение сопротивления токопроводящей жилы.

2. Активное сопротивление жилы кабеля на частоте n-ой гармоники у Жежеленко И.В. [3] определяется по выражению

$$R_{Ж} = R \cdot (0{,}187 + 0{,}532 \cdot \sqrt{n}), \qquad (4)$$

где n – номер гармоники; R – сопротивление жилы при максимально допустимой рабочей температуре $T_{Ж\,MAX}$, Ом/м

$$R = R_{(20)} \cdot [1 + \alpha \cdot (T_{Ж\,MAX} - 20)],$$

где $R_{(20)}$ – сопротивление жилы при 20°С, Ом/м; α = 0,004 1/°С – температурный коэффициент сопротивления.

В выражении (4) смущает тот факт, что на частоте основной гармоники n=1 сопротивление жилы кабеля $R_Ж$ получается меньше значения R сопротивления жилы постоянному току. В то же время в [3] ничего не сказано, для каких гармоник следует применять данное выражение.

Если сравнить аппроксимации Жежеленко И.В и Лариной Э.Т., то мы получим следующую картину (рис. 1).

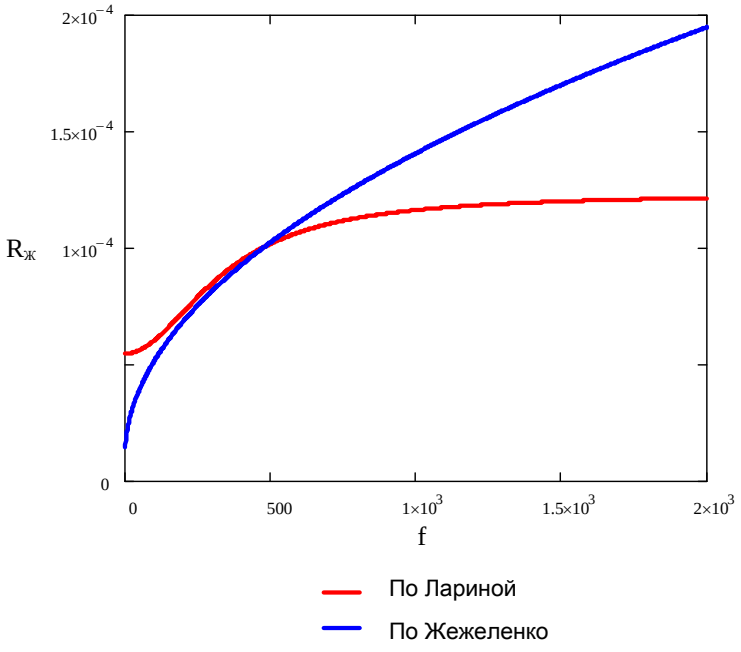

Рис. 1. Зависимости сопротивления токопроводящей жилы от частоты протекающего тока

Из анализа графика на рис. 1 можно сделать вывод, что аппроксимации Лариной Э.Т. и Жежеленко И.В. примерно совпадают в области частот от 150 до 550 Гц. При более низких частотах и более высоких – аппроксимации существенно различаются.

3. Шпиганович А.Н. предлагает учитывать поверхностный эффект следующим образом [4]:

$$R_{Ж} = R \cdot \frac{F_{Ж}}{F_{Ж}^{(n)}}, \tag{5}$$

где $F_{Ж}$ – площадь поперечного сечения токопроводящей жилы; $F_{Ж}^{(n)}$ – активное сечение токопроводящей жилы на n-ой гармонике.

Предлагается учет скин-эффекта вести путем расчета толщины токопроводящего слоя

$$\Delta = C \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \varepsilon_0 \cdot R_{УД}}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot n}}, \tag{6}$$

где C – скорость света; $R_{УД}$ – удельное сопротивление жилы; ε_0 – электрическая постоянная; f – частота сети; n – номер гармоники

$$F_{Ж}^{(n)} = \pi \cdot \left[r^2 - \Delta^2 \cdot 0{,}5 \cdot \left(\frac{r - \Delta}{|r - \Delta|} + 1 \right) \right], \tag{7}$$

где r – радиус жилы.

Выражение (6) получено для условия бесконечно толстого провода, т.е. когда зависимость плотности тока от глубины экспоненциальная и дает хорошие результаты (малую погрешность) когда толщина скин-слоя в 10 раз меньше радиуса жилы. Когда толщина скин-слоя соизмерима с радиусом жилы, или даже превышает значение радиуса, выражение (6) дает существенную погрешность (значение величины скин-слоя получается меньше, чем на самом деле, т.е. поверхностный эффект преувеличен), которую нужно учитывать при расчете активного сечения жилы на на n-ой гармонике.

Далее будет проведен более детальный анализ существующих методик учета поверхностного эффекта с целью определения области их применения.

Электрическое старение изоляции при оценке отрицательного воздействия несинусоидальности напряжения на срок службы кабельных линий, как правило, не учитывают. В [3] авторы предлагают математическую модель для определения срока службы кабельных линий в несинусоидальном режиме работы

$$V_{не} = V_{ном} \cdot \exp\left[- K_a \cdot \left(\frac{1}{T_{ном}} - \frac{1}{T_{не}} \right) \right], \qquad (8)$$

где $T_{ном}$ – температура изоляции в номинальном режиме, К; $T_{не}$ – температура изоляции при наличии высших гармоник, К; K_a – коэффициент пропорциональный энергии активации, К.

В результате проведения ускоренных испытаний в условиях несинусоидальности для кабелей среднего (низкого) напряжения с этиленпропиленовой резиновой изоляцией и с изоляцией из сшитого полиэтилена было получено значение $K_a = 12430K$.

Проанализировав выражение (8), авторы пришли к мнению, что в диапазоне рабочих температур с достаточной степенью точности его можно аппроксимировать уравнением (9) при $\beta = 0{,}0866\,^{o}C^{-1}$.

$$V = V_{ном} \cdot e^{-\beta \Delta \tau}, \qquad (9)$$

где V – срок службы изоляции при рассматриваемой температуре; $V_{ном}$ – срок службы изоляции при номинальной температуре $\vartheta_{ном}$; β – коэффициент старения изоляции, который определяется по выражению

$$\beta = \frac{\ln 2}{\Delta \vartheta} \qquad (10)$$

$\Delta \vartheta$ – это такое значение температуры изоляции, увеличение на которое приводит к сокращению ее срока службы вдвое, $\Delta \vartheta$ зависит от класса нагревостойкости изоляции.

Если рассчитать дополнительный нагрев изоляции КЛ в несинусоидальном режиме, то с помощью выражения (9) можно определить срок службы кабелей с бумажной изоляцией и изоляцией из поливинилхлоридного пластиката.

Авторы предлагают рассчитать дополнительный нагрев изоляции на основании тепловой схемы замещения трехжильного кабеля, проложенного в земле, и на основании этих данных по (9) определить срок службы кабеля в несинусоидальном режиме. При определении дополнительного нагрева предлагается учитывать потери в жиле и пренебречь потерями в изоляции (кроме кабелей с изоляцией из ПВХ на напряжение 6кВ и выше), хотя теоретически при высоком уровне гармоник в питающем напряжении сопротивление изоляции должно оказывать влияние на дополнительный нагрев.

Математическая модель (9) описывает старение по аналогии с асинхронным двигателем т.к. взаимное влияние жил друг на друга будет схоже с процессами, происходящими в двигателе, модель используется для описания процессов, происходящих в трехжильных кабелях, но она не описывает их в одножильных.

Таким образом, в настоящее время для проведения анализа электромагнитных процессов в сетях низкого напряжения с нелинейными нагрузками в целях определения их влияния на сеть используются соответствующие математические модели. Однако существующие модели не учитывают в полной мере параметры элементов электрической сети и показатели качества электроэнергии. Область применения некоторых из существующих математических моделей сильно ограничена.

Поэтому дальнейшее развитие исследований по разработке эффективных моделей, устанавливающих взаимосвязь между параметрами, характеризующими степень несинусоидальности токов/напряжений и параметрами кабелей (срок службы, сопротивление жилы и т.д.) является актуальным.

Разработка математической модели, учитывающей влияние высших гармоник на кабельные линии, позволит на этапе проектирования электрических сетей более точно выбирать сечения кабелей, работающих на нелинейную нагрузку и тем самым исключить их преждевременный выход из строя.

Список литературы:

1. Ларина, Э.Т. Силовые кабели и кабельные линии: учеб. пособие для вузов / Э.Т. Ларина. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 368 с.

2. Брагин, С.М. Электрический и тепловой расчет кабеля / С.М. Брагин. – М.: Го сэнергоиздат, 1960. – 328 с.

3. Жежеленко, И.В. Избранные вопросы несинусоидальных режимов в электрических сетях предприятий / И.В. Жежеленко, Ю.Л. Саенко, Т.К. Бараненко, А.В. Горпинич, В.В. Нестерович. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 296 с.

4. Шпиганович, А. Н. Анализ влияния высших гармонических составляющих на безотказность электроизоляционных покрытий / А. Н. Шпиганович, С.В. Довженко [Электрон. ресурс]. – 2008. – Режим доступа: http://www.jurnal.org/articles/2008/elect7.html. – Дата обращения 02.03.2012.