

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ ГРУППЫ ОДНОФАЗНЫХ ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКОВ С НЕЛИНЕЙНЫМИ ВОЛЬТАМПЕРНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Ленко В.Г.

Донецкий национальный технический университет

edek@dgtu.donetsk.ua

Постановка задачи. В проектировании городских электрических сетей 380/220 В расчет электрических нагрузок выполняется по активным P и реактивным Q мощностям электроприемников [1]. Эти параметры режима относятся к синусоидальным величинам, поэтому существующий метод расчета является корректным лишь при небольшой нелинейности электроприемников, когда при синусоидальном напряжении сети их токи можно считать синусоидальными. Между тем, нагрузка современных электроприемников имеет импульсный характер: например, компактных люминесцентных ламп (КЛЛ) [2], телевизоров, компьютеров (рис. 2.27 и 2.28 в [3]).

Обычно при наличии нелинейных нагрузок расчет производится по величинам и фазам гармонических и симметричных составляющих токов [2-4]. Теоретически такой подход является точным, однако при практической реализации неизбежны погрешности, обусловленные, например, ограничением количества учитываемых гармоник. При геометрическом суммировании составляющих суммируются и погрешности.

Целью статьи является разработка метода расчета нагрузок, свободного от указанных недостатков. Для краткости рассматриваются лишь КЛЛ, но все выводы распространяются и на другие электроприемники. Напряжение сети считается неизменным, симметричным и синусоидальным.

Сущность метода. Существующие методы оперировали с действующими значениями индивидуальных параметров режима, исходя из формул суммирования синусоидальных составляющих. В основу предлагаемого метода положим формулы суммирования мгновенных значений токов. Исходными для расчетов являются кривые фазных токов $i(t)$.

Если между фазами А, В, С и нулевым проводом N подключено t_A, t_B, t_C приемников, то суммарные токи составят:

$$I_{A,B,C\Sigma}(t) = \sum_{i=1}^{m_{A,B,C}} i_{A,B,Ci}(t), \quad (1)$$

$$I_{N\Sigma}(t) = i_{AN}(t) + i_{BN}(t) + i_{CN}(t). \quad (2)$$

Суммарные кривые токов дают полную информацию о нагрузках фаз и нулевого провода. По ним могут быть рассчитаны любые показатели режима сети электроснабжения, необходимые для выбора сечения проводов по нагреву, оценки энергосбережения и ЭМС.

Подчеркнем, что существующие методы, по сути, также исходили из формул (1) и (2). Однако стремление свести до минимума объем исходной информации приводило к анализу действующих, а не мгновенных токов. Компьютеризация позволяет оперировать с большими объемами исходных данных, что делает применение предлагаемого метода актуальным, как принципиально точного.

Исходные данные. Необходимые для расчетов кривые токов ламп определяются экспериментально. На рис. 1 показаны осциллограммы токов КЛЛ1- КЛЛ6 номинальной мощностью P_n от 15 до 23 Вт. Лампы подключались к фазе А, напряжение которой было практически синусоидальным:

$$u_A(t) = \sqrt{2}U_n \sin \omega_f t,$$

где U_n – номинальное значение фазного напряжения, $\omega_f = 2\pi f = 100\pi$ – угловая частота при $f = 50$ Гц и длительности цикла $t_f = 1/f = 0,02$ с.

Нагрузка КЛЛ1 первого поколения мощностью 18 Вт (рис. 1,а) не является импульсной. Такие лампы потребляют значительную реактивную мощность, но малую мощность искажений: 35,8 вар и 7,37 ВА. У современных КЛЛ нагрузка представляет последовательность разнополярных импульсов. Лампы генерируют реактивную мощность с $\cos \varphi$ от 0,76 до 0,975, однако потребляют большую мощность искажений: коэффициент мощности зарегистрирован в пределах от 0,567 до 0,69.

Анализ показывает, что в системе относительных единиц (о.е.), базовой величиной которой для каждой КЛЛ является действующее значение активной составляющей I_a тока, кривые тока довольно близки. Поэтому при отсутствии сведений в качестве исходной можно принимать кривую тока в о.е., представленную на рис. 1,в. Для перехода к именованным единицам ее ординаты надо умножить на P_n/U_n .

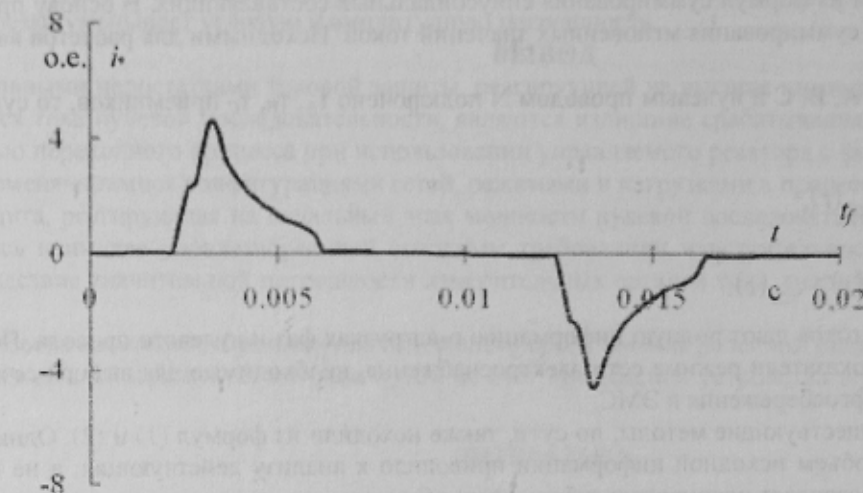
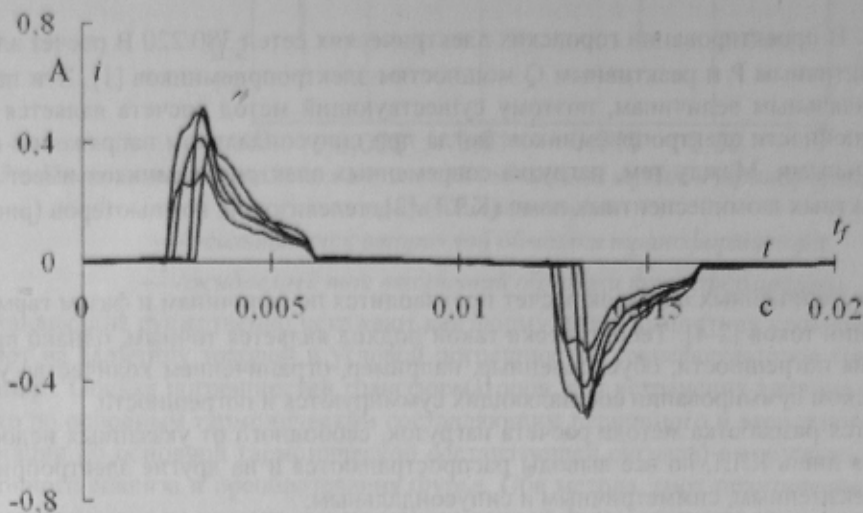
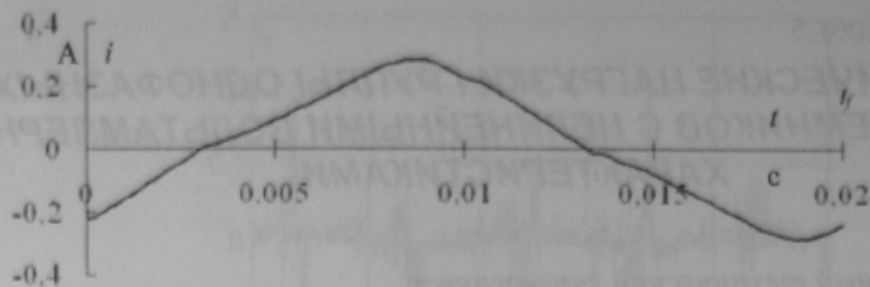


Рисунок 1

Погрешности существующего метода. Предлагаемый метод является принципиально точным, не имеющим методических недостатков. Погрешности расчета нагрузок по существующему методу оценим на примере выбора сечений проводов. Для краткости сечения фазных и нулевого проводов будем считать одинаковыми. Допустимую погрешность расчетов в теории электрических нагрузок принимают равной $\pm 10\%$.

Погрешность расчета складывается из двух составляющих. Во-первых, использование только активной P и реактивной Q мощностей означают, что выбор сечения выполняется по действующему значению I_f тока первой гармоники, хотя это необходимо производить по действующему значению I всего тока. Во-вторых, для силовых токов выбор сечения производится по наиболее загруженной фазе, ток в которой больше тока I_N нулевого провода или равен ему. Для импульсных нагрузок это выполняется далеко не всегда. В соответствии с этим в процентах относительная погрешность по току составит

$$\delta_I = \begin{cases} (I_{f\Sigma}/I_\Sigma - 1)100 & \text{при } I_\Sigma \geq I_{N\Sigma}, \\ (I_{f\Sigma}/I_{N\Sigma} - 1)100 & \text{при } I_\Sigma \leq I_{N\Sigma}. \end{cases} \quad (3)$$

Обозначив через

$$I_{f*} = I_{f\Sigma}/I_\Sigma, \quad k_N = I_{N\Sigma}/I_\Sigma,$$

представим (3) в виде

$$\delta_f = \begin{cases} (I_{f*} - 1)100 & \text{при } k_N \leq 1, \\ (I_{f*}/k_N - 1)100 & \text{при } k_N \geq 1. \end{cases} \quad (4)$$

Анализ удобно выполнить для идеализированной кривой тока лампы в виде разнополярных прямоугольных импульсов с одинаковой длительностью Δ_n . Для того, чтобы лампа с такой кривой тока генерировала реактивную мощность, середина положительного импульса должна находиться в первой половине цикла t_f . В о.е. длительность импульса $\Delta_{и*} = \Delta_n/t_f$ не может быть больше 0,5.

Если к фазе подключена одна лампа, токи фазного и нулевого проводов совпадают, а их отношение равно единице (горизонталь 1 на рис. 2). Поэтому погрешность расчета будет возникать только от неучета искажения синусоиды.

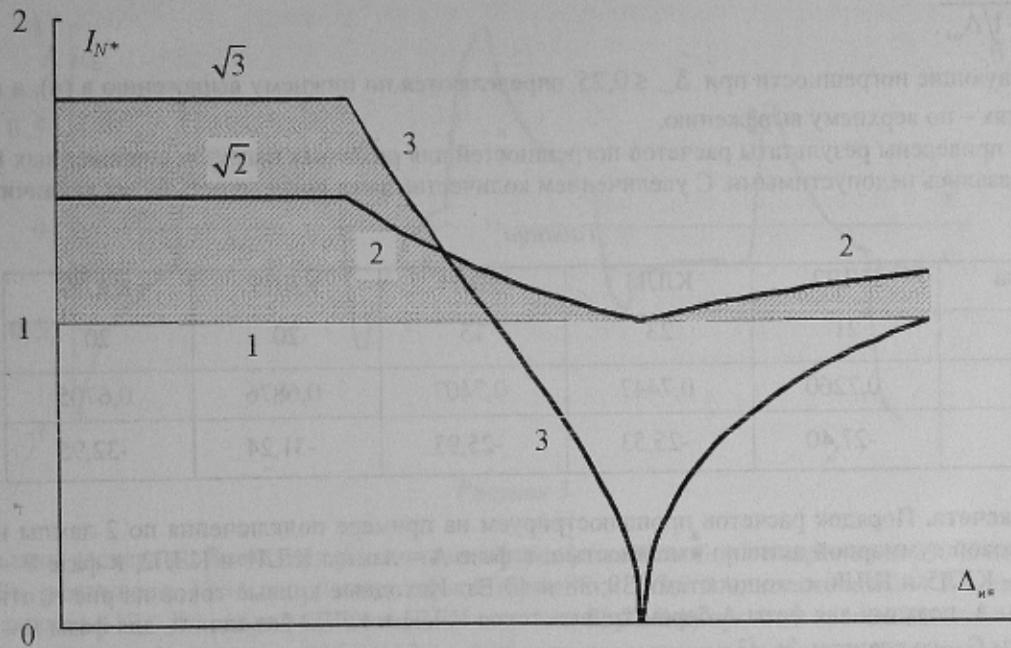


Рисунок 2

Можно показать, что

$$I_{f*} = \frac{2}{\pi\sqrt{\Delta_{и*}}} \sin \pi\Delta_{и*} \quad \text{при } \Delta_{и*} \leq 1/2. \quad (5)$$

Подстановка (5) в любое из выражений (4) дает зависимость погрешности от длительности импульса. Чем меньше длительность импульса, тем больше погрешность. При $\Delta_{и*} \rightarrow 0$ погрешность достигает -100%. При $\Delta_{и*} \geq 0,25$ погрешности не выходят за допустимый предел -10%.

Перейдем к случаю, когда в двух фазах подключено по одной лампе. При синусоидальной нагрузке ток в нулевом проводе по величине также совпадает с фазным. Для импульсной нагрузки дело обстоит иначе. При малых длительностях $\Delta_{и*} < 1/6$ при суммировании импульсы токов фаз не перекрываются, вследствие чего в нулевом проводе суммарная длительность импульсов в 2 раза превышает длительность импульсов в любой фазе, поэтому $k_N = \sqrt{2} > 1$ (горизонтальный участок кривой 2 на рис. 2).

В пределах $1/6 \leq \Delta_{и*} \leq 1/3$ происходит наложение импульсов разной полярности, в связи с чем суммарная длительность импульсов тока в нулевом проводе уменьшается. Соответственно уменьшается и величина

$$k_N = \frac{1}{\sqrt{3\Delta_{и*}}}.$$

При $\Delta_{и*} = 1/3$ токи в фазе и нулевом проводе совпадают. Наконец, при $\Delta_{и*} > 1/3$ перекрываются не только части разнополярных импульсов, но и части импульсов одной полярности. Несмотря на уменьшение длительностей, ток в нулевом проводе увеличивается, так как наложение однополярных импульсов дает двойную величину импульса. В этом случае

$$k_N = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{6 - \Delta_{и*}}$$

Из рис. 2 следует, что при двух лампах погрешность расчетов определяется нижним выражением (4) для всех значений длительности импульса.

При синусоидальной нагрузке и подключении в каждой фазе по лампе ток в нулевом проводе равен нулю. В случае импульсной нагрузки равномерное распределение по фазам при неперекрывающихся импульсах дает ток нулевого провода в $\sqrt{3}$ превышающий фазный (горизонтальный участок кривой 3 на рис. 2). В отличие от предыдущего случая в пределах $1/6 \leq \Delta_{и*} \leq 1/3$ ток в нулевом проводе уменьшается не до фазного, а до нуля, причем он становится меньше фазного при $\Delta_{и*} > 0,25$. В этом случае

$$k_N = \sqrt{1/\Delta_{и*} - 3}.$$

При $\Delta_{и*} > 1/3$ происходит возрастание тока, но он остается меньше фазного:

$$k_N = \sqrt{3 - 1/\Delta_{и*}}.$$

Соответствующие погрешности при $\Delta_{и*} \leq 0,25$ определяются по нижнему выражению в (4), а при больших длительностях – по верхнему выражению.

В таблице приведены результаты расчетов погрешностей для реальных нагрузок современных КЛЛ. Для всех ламп они оказались недопустимыми. С увеличением количества ламп погрешность будет увеличиваться.

Таблица

| Лампа | КЛЛ2 | КЛЛ3 | КЛЛ4 | КЛЛ5 | КЛЛ6 |
|--------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $P_{н}, \text{Вт}$ | 21 | 23 | 15 | 20 | 20 |
| I_f | 0,7260 | 0,7447 | 0,7407 | 0,6876 | 0,6705 |
| $\delta_f, \%$ | -27,40 | -25,53 | -25,93 | -31,24 | -32,95 |

Пример расчета. Порядок расчетов проиллюстрируем на примере подключения по 2 лампы на фазу с примерно одинаковой суммарной активной мощностью: в фазе А – лампы КЛЛ1 и КЛЛ2, в фазе В – КЛЛ3 и КЛЛ4, в фазе С – КЛЛ5 и КЛЛ6 с мощностями 39, 38 и 40 Вт. Исходные кривые токов на рис. 1 относятся к напряжению фазы А, поэтому для фазы А берем кривые токов КЛЛ1 и КЛЛ2 без сдвига, для фазы В – со сдвигом $-2t_f/3$ и фазы С – со сдвигом $2t_f/3$.

Просуммируем кривые токов в фазах и всех шести ламп. Полученные суммарные графики (рис. 3) содержат полную информацию, достаточную для решения любых задач электроснабжения.

Для выбора сечений вычислим действующие значения: $I_A = 0,2321$, $I_B = 0,2959$, $I_C = 0,2556$, $I_N = 0,4318$ А. Как и следовало ожидать, ток в нулевом проводе превышает наибольшее значение фазного тока (фаза В). По этому току и следует выбирать сечение.

Потери активной мощности составят

$$\Delta P = (I_A^2 + I_B^2 + I_C^2 + I_N^2) r, \quad (5)$$

где r – активное сопротивление провода.

Для определения показателей ЭМС соответствующие параметры режима также вычисляются по суммарным графикам путем разложения на высшие гармоники и симметричные составляющие без суммирования составляющих от каждой лампы, что исключает погрешность суммирования.

Для первой гармоники получим следующие значения токов: $I_{IA\Sigma} = 0,2089$, $I_{IB\Sigma} = 0,2091$, $I_{IC\Sigma} = 0,1802$, $I_{IN\Sigma} = 0,1939$ А. Несинусоидальные составляющие

$$I_{иc} = \sqrt{I^2 - I_f^2}$$

составили: $I_{иcA\Sigma} = 0,101$, $I_{иcB\Sigma} = 0,2089$, $I_{иcC\Sigma} = 0,1813$, $I_{иcN\Sigma} = 0,3858$ А. В нулевом проводе преобладает третья гармоника. Вместе с тем, хотя суммы номинальных мощностей по фазам примерно одинаковы, есть и другие гармоники – так как кривые токов ламп разные.

По существующему методу сечение выбирается по наибольшему фазному току первой гармоники, равному 0,2091 А. Погрешность расчета по сравнению с током 0,4318 равна -51,6 %, что более чем в 5 раз больше допустимой.

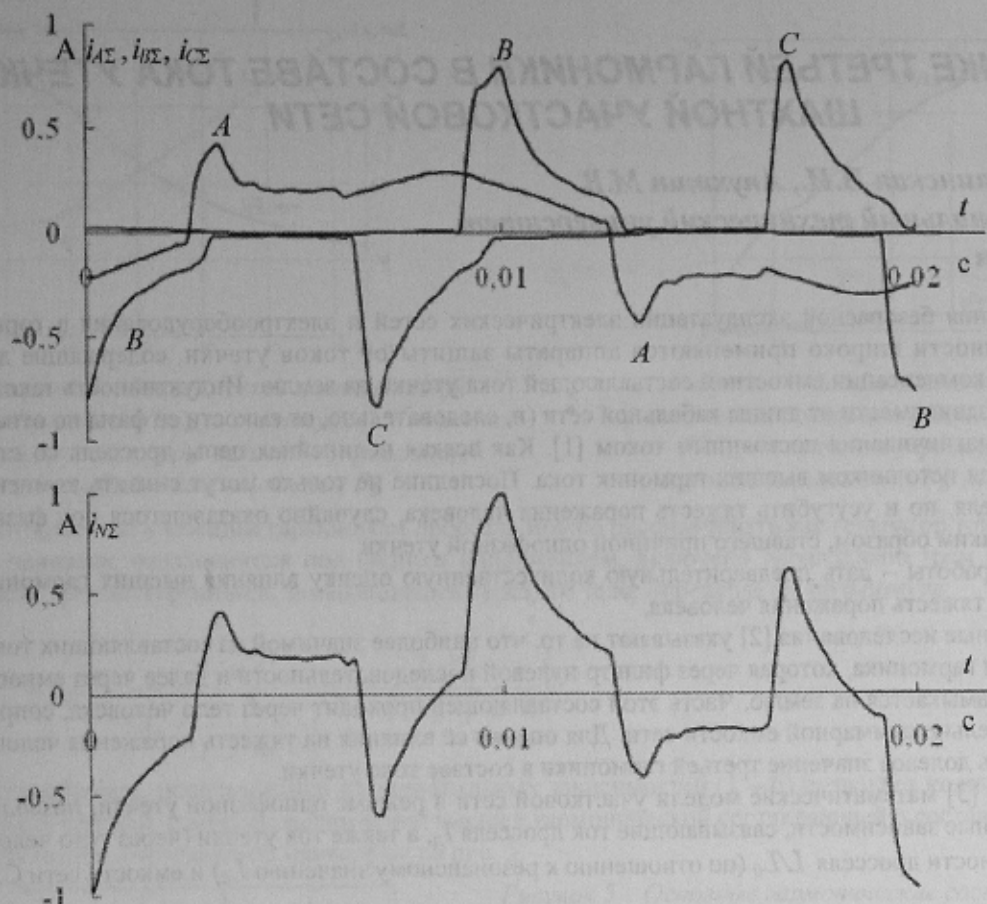


Рисунок 3

Результаты расчета по Дрехслеру [5] мощностей трехфазной сети при напряжении 230 В следующие: активная 117 Вт, реактивная -12,16 вар, полная первой гармоники 117,6 ВА, искажений 294 ВА, полная прямой последовательности 117,6 ВА, обратной последовательности 52,52 ВА, нулевой последовательности 49,18 ВА, полная 335,7 ВА. Полная мощность в $335,7/117,6 = 2,85$ раза превышает полную мощность первой гармоники.

Выводы.

1. Существующий метод расчета электрических нагрузок по активной и реактивной мощностям не учитывает мощности искажений, создаваемые КЛЛ, что приводит к существенному занижению требований к электрической сети при выборе сечения проводов, оценке ЭМС и энергосбережения.
2. Предложенный метод расчета по индивидуальным кривым тока является точным, дает полную информацию о суммарной нагрузке группы электроприемников.
3. Существующие нормы [1] необходимо дополнить указаниями по выполнению расчетов при наличии нелинейных нагрузок.

ЛИТЕРАТУРА

1. ДБН В. 2.5.-23-2003. Державні будівельні норми України. Інженерне обладнання будинків і споруд. Проектування електрообладнання об'єктів цивільного призначення. – Київ: Держкомітет України з будівництва та архітектури, 2004. – 129 с.
2. Курінний Е.Г., Ленко В.Г. Энергетичні співвідношення в електричних мережах з енергозберігальними лампами. – Технічна електродинаміка, 2006, ч. 2. – С. 46-49.
3. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 331 с.
4. Кузнецов В. Г., Куренный Э. Г., Лютый А. П. Электромагнитная совместимость. Несимметрия и не-синусоидальность напряжения. – Донецк: Норд-Пресс, 2005. – 250 с.
5. Дрехслер Р., Измерение и оценка качества электроэнергии при несимметричной и нелинейной нагрузке, М: Энергоатомиздат, 112 с., 1985.