

УДК 621.316.1

И.В. Пентегов, д-р техн. наук**В.М. Безручко**, инженер**А.Л. Приступа**, канд. техн. наук

Черниговский государственный технологический университет, г. Чернигов, Украина

ВЫБОР МЕСТ ПРИСОЕДИНЕНИЯ ФИЛЬТРА ТОКОВ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ К РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ ВЫСОТНЫХ АДМИНИСТРАТИВНЫХ И ОФИСНЫХ ЗДАНИЙ

Представлены основные подходы при расчете и выборе мест присоединения фильтра токов нулевой последовательности к распределительной сети высотных административных и офисных зданий с учетом критериев: фильтрации высших гармоник тока нулевой последовательности; подавления высших гармоник напряжения нулевой последовательности; изменение потерь, вызванных токами гармоник нулевой последовательности в распределительной сети.

Введение

Большинство оборудования, которое используется в административных и офисных зданиях, построено с использованием импульсных источников питания с бестрансформаторным входом и представляют собой нелинейные нагрузки, генерирующие в сеть высшие гармоники тока. Суммарный эффект от этих нагрузок может проявляться в искажении напряжения, которое воздействует на другое оборудование, питающееся от той же сети. На трехфазную сеть с нулевым проводом особое влияние оказывают высшие гармоники тока, кратные трем (3, 9, 15, ...), определяющие высокие значения суммарного коэффициента гармоник тока THD_I (Total Harmonic Current Distortion) и напряжения THD_U (Total Harmonic Voltage Distortion), генерируемые однофазными нагрузками. В трехфазной системе фаз гармоники токов прямой и обратной последовательностей по нулевому проводнику не протекают, следовательно, не вызывают падения напряжения и дополнительных потерь электроэнергии в нейтрали, в отличие от гармоник токов нулевой последовательности (НП), возникающих из-за несимметричного распределения нагрузок между фазами и гармоник, кратных трем. В подавляющем большинстве случаев гармоники, кратные трем, в трехфазных цепях совпадают по фазе и образуют нулевую последовательность. Все гармоники нулевой последовательности суммируются в проводнике нейтрали. В результате, даже при симметричной загрузке фаз значение тока в нейтрали может превышать значения фазных токов. Например, при фазных токах, равных 37 А, ток нейтрали может составлять 55 А [1]. Вследствие этого нейтраль трехфазных сетей может перегреваться вплоть до воспламенения. Положение усугубляется ещё и тем, что в существующих сетях используется провод нейтрали меньшего поперечного сечения, чем сечение фазных проводов. Токи нулевой последовательности приводят к дополнительным потерям не только в нейтрали, но и в трансформаторах и электрических машинах, к нагреву конденсаторов и кабелей распределительной сети и другим негативным эффектам. Кроме того, гармоники токов НП увеличивают искажение формы кривой напряжения, отрицательно влияя на электромагнитную совместимость нагрузок. Для борьбы с токами НП широкое распространение получили разработанные в Институте электродинамики НАН Украины автотрансформаторные фильтры токов нулевой последовательности (ФТНП) с соединением обмоток в зигзаг [2-3], а также предложенные авторами фильтры [4].

На сегодняшний день нет четких рекомендаций по выбору мест присоединения ФТНП к распределительной сети высотных административных или офисных зданий. Поэтому целесообразно проведение исследований для определения мест присоединения ФТНП для конкретной сети здания, при подключении к которым ФТНП будет обладать наибольшей эффективностью. Это позволит выбирать ФТНП с минимальными

требованиями к параметрам, а следовательно, минимальной стоимостью, что является актуальной задачей.

Наиболее предпочтительная точка присоединения ФТНП к сети должна определяться на основании анализа основных параметров режима сети. Поэтому выбор производится с учетом различных критериев, в качестве которых можно привести следующие.

- 1) Фильтрация высших гармоник тока НП для разгрузки нулевого проводника.
- 2) Подавление высших гармоник напряжения НП для повышения качества электроэнергии.
- 3) Изменение потерь, вызванных токами гармоник НП в распределительной сети.

Выбор схемы замещения низковольтной сети с нелинейными нагрузками

В высотных зданиях с большим количеством этажей выполняют один, два (или более) стояка (магистральных шинопроводов, идущих от трансформаторной подстанции (ТП) на первом этаже и до последнего этажа). В особых случаях применяют варианты размещения трансформаторной подстанции между этажами здания. В таком случае шинопроводы низкого напряжения расходятся вверх и вниз по зданию. Однако, последний вариант связан с большими техническими сложностями (подъем трансформатора, использование только сухих трансформаторов, создание высоковольтного ввода в здание, построение систем принудительной вентиляции и т.д.) [5].

В статье для упрощения рассмотрим исполнение здания с одним стояком. Составим схему замещения сети для расчета токов в нулевом рабочем проводнике в номинальном режиме. Для расчетов воспользуемся традиционной моделью, основанной на использовании однолинейной схемы замещения, в которой нелинейная нагрузка каждого этажа здания задаётся источником тока высших гармоник. Данный подход является традиционным для определения искажения синусоидальности кривой напряжения для низковольтных распределительных сетей [6, 7].

При построении схем замещения и расчетах примем ряд допущений: нагрузка в здании однотипна и распределена равномерно по этажам; нагрузка в фазах на каждом этаже симметрична, поэтому в нулевой провод попадают только гармоники токов НП.

Рассмотрим случай использования одного ФТНП для фильтрации гармоник токов НП. Схема замещения распределительной сети m -этажного здания при условии подключения ФТНП на k -том этаже представлена на рисунке 1.

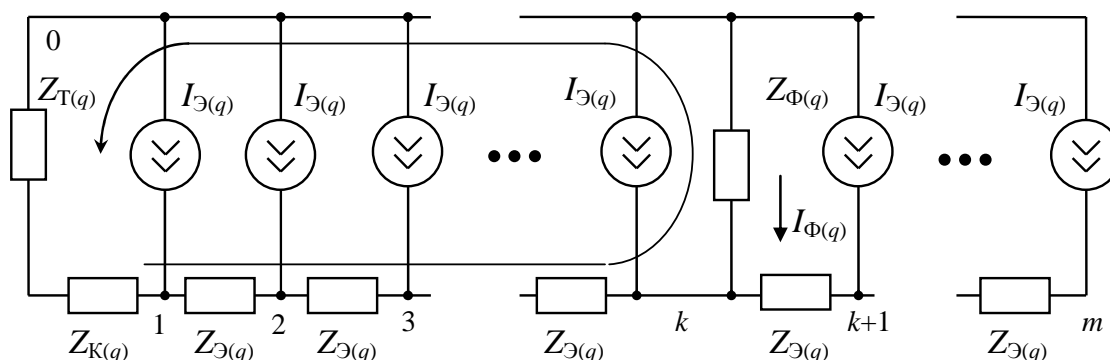


Рис. 1. Однолинейная схема замещения сети НН с одним ФТНП

На рисунке даны обозначения: $Z_{T(q)}$ – полное сопротивление трансформатора для q -той гармоники тока НП, $Z_{T(q)} = R_T + j \cdot q \cdot X_T$; X_T – реактивное сопротивление трансформатора токам НП основной частоты; $Z_{K(q)}$ – полное сопротивление участка трансформатор-первый этаж для q -той гармоники НП $Z_{K(q)} = R_K + j \cdot q \cdot X_K$; X_K – реактивное сопротивление участка трансформатор-первый этаж токам НП основной частоты. Необходимо отметить, что в сопротивление $Z_{K(q)}$ входит сопротивление шинопровода участка

трансформатор-первый этаж, измерительных трансформаторов тока и автоматических выключателей. $Z_{\Delta(q)}$ – полное сопротивление шинпровода между этажами для q -той гармоники НП, $Z_{\Delta(q)} = R_{\Delta} + j \cdot q \cdot X_{\Delta}$; X_{Δ} – реактивное сопротивление шинпровода между этажами токам НП основной частоты. $I_{\Delta(q)}$ – ток q -той гармоники одного этажа.

Приведенная схема замещения несколько отличается от традиционных схем замещения, приведенных в работах [6,7]. Это связано с тем, что в традиционных схемах необходимо пересчитывать параметры схемы замещения (сопротивление кабеля, трансформатора и т.д.) на ток одной фазы. Представленная схема замещения ориентирована на операции с током нулевого рабочего проводника (далее в статье нулевого проводника), другими словами, с утроенным током нулевой последовательности фазы. Поэтому увеличение сопротивления нулевого проводника в схеме замещения не происходит, а сопротивление фазного проводника уменьшается в 3 раза.

Необходимо отметить, что данный подход не учитывает изменение тока нелинейных потребителей при изменении качества и амплитуды напряжения, однако позволяет определить место присоединения ФТНП к сети, в которой он будет обладать наибольшей эффективностью, без оценки мощности потребителей и доли нелинейных нагрузок. Это в значительной степени упрощает расчеты по сравнению с существующими методиками [2] и позволяет получить приемлемую для практики точность.

Определение точки присоединения ФТНП к сети для наиболее эффективной разгрузки нулевого проводника от гармоник токов нулевой последовательности

Рассмотрим распределительную сеть высотного здания при условии присоединения одного ФТНП к сети. Составим уравнения для расчета схемы замещения сети (рис. 1) и определения места установки фильтра.

Составим систему уравнений, используя метод контурных токов. Таким образом, найдем токи в элементах схемы замещения без фильтра. При присоединении фильтра образуется дополнительный контур. Для схемы замещения сети (рис. 1), при условии отключенного ФТНП от сети ($Z_{\Phi} = \infty$), ток в нулевом проводнике на межэтажных участках:

$$I_{M\Delta \text{ без } \Phi(q)}(n) = I_{\Delta(q)} \cdot (m - n + 1), \quad (1)$$

где n – номер межэтажного участка (1 – трансформатор-первый этаж; 2 – 1-2 этаж, 3 – 2-3 этаж, и т.д.).

При присоединении фильтра образуется дополнительный контур. Из метода контурных токов получим результирующие токи в элементах:

$$I_{M\Delta(q)}(n) = \begin{cases} I_{\Delta(q)} \cdot (m - n + 1) - I_{\Phi(q)}(k) & \text{при } 1 \leq n \leq k; \\ I_{\Delta(q)} \cdot (m - n + 1) & \text{при } n > k, \end{cases} \quad (2)$$

где $I_{\Phi(q)}$ – ток контура с фильтром; k – этаж, на котором подключен ФТНП.

Ток $I_{\Phi(q)}$ найдем из соображений, что при появлении контура с током $I_{\Phi(q)}$ падение напряжения на участке от трансформатора до фильтра уменьшится на величину, равную произведению тока $I_{\Phi(q)}$ на полное сопротивление элементов схемы замещения, и будет равно напряжению на фильтре:

$$U_{01(q)} + U_{1k(q)} - I_{\Phi(q)} \cdot [Z_{T(q)} + Z_{K(q)} + Z_{\Delta(q)} \cdot (k - 1)] = I_{\Phi(q)} \cdot Z_{\Phi(q)}, \quad (3)$$

где $U_{01(q)}$ – падение напряжения q -той гармоники на участке 0 – 1; $U_{1k(q)}$ – падение напряжения q -той гармоники на участке от первого этажа до этажа установки фильтра.

Найдем падение напряжения на элементах схемы замещения. При отключенном $Z_{\Phi(q)}$ напряжение на межэтажных участках $U_{01(q)} = I_{\Delta(q)} \cdot m \cdot (Z_{T(q)} + Z_{K(q)})$; $U_{12} = I_{\Delta(q)} \cdot (m - 1) \cdot Z_{\Delta(q)}$; $U_{23} = I_{\Delta(q)} \cdot (m - 1 - 1) \cdot Z_{\Delta(q)}$; $U_{34(q)} = I_{\Delta(q)} \cdot (m - 2 - 1) \cdot Z_{\Delta(q)}$; ...

$$U_{(n-1)n(q)} = I_{\Delta(q)} \cdot (m - n + 1) \cdot Z_{\Delta(q)}. \quad (4)$$

Исходя из этого, можно записать падение напряжения на всей длине магистрального шинопровода от первого до последнего этажа:

$$U_{1m(q)} = I_{\Delta(q)} \cdot Z_{\Delta(q)} \cdot m \cdot (m-1) / 2. \quad (5)$$

Тогда напряжение на участке от 1 этажа до этажа установки фильтра:

$$U_{1k(q)} = U_{1m(q)} - U_{km(q)} = I_{\Delta(q)} \cdot Z_{\Delta(q)} \cdot [m \cdot (m-1) - (m-k) \cdot (m-k-1)] / 2 = I_{\Delta(q)} \cdot Z_{\Delta(q)} \cdot (2m \cdot k - k^2 - k) / 2. \quad (6)$$

Подставив (5) в (3) и выразив $I_{\Phi(q)}$ получим:

$$I_{\Phi(q)}(k) = I_{\Delta(q)} \frac{m \cdot (Z_{T(q)} + Z_{K(q)}) + Z_{K(q)} \cdot (2m \cdot k - k^2 - k) / 2}{Z_{\Phi(q)} + Z_{T(q)} + Z_{K(q)} + Z_{T(q)} \cdot (k-1)}. \quad (7)$$

Для определения места установки ФТНП для критерия разгрузки нулевого проводника от тока НП необходимо найти значение параметра k – этажа, на котором будет присоединен ФТНП к сети, при котором максимальное значение тока гармоник НП на межэтажных участках будет минимальным.

При отключенном фильтре гармоники тока НП, генерируемые нелинейной нагрузкой, замыкаются через трансформатор, поэтому максимальное значение тока в нулевом проводнике будет на участке сети трансформатор-первый этаж. А при условии включенного фильтра максимум тока может находиться на участках: трансформатор-первый этаж и на межэтажных промежутках вблизи фильтра, т.к. гармоники тока НП, генерируемые нелинейной нагрузкой, замыкаются не только через трансформатор, но и фильтр. Для того, чтобы найти величину максимального тока в нулевом проводнике, необходимо сравнить токи на выше указанных участках.

Для примера рассмотрим высотное 25 этажное офисное здание с питанием от пристроенной двухтрансформаторной подстанции с трансформаторами ТМЗ-1000/10. Параметры трансформаторов $Z_{T(q)} = 1,3 + j \cdot q \cdot 8,9$ мОм [8]. По этажам здания проложен шинопровод ШМА4-1250 с параметрами $r_1=0,034$ мОм/м, $x_1=0,016$ мОм/м, $r_{НП}=0,054$ мОм/м, $x_{НП}=0,053$ мОм/м [9]. Параметры фильтра $Z_{\Phi} = 10 + j \cdot q \cdot 5$ мОм [10]. Длина шинопровода от трансформаторов до стояка 20м, высота этажа 3,8м [5].

Величина третьей гармоники тока является наибольшей среди гармоник НП и определяет действующее значение тока в нулевом проводнике. Большинство методик по определению сечения нулевого проводника сети основываются лишь на расчетах величины третьей гармоники. Поэтому в дальнейшем для примера будем производить расчеты для третьей гармоники. Необходимо отметить, что приведенные формулы позволяют определять величины и других гармоник НП.

Согласно выше представленным формулам (1)-(7), построим график зависимости максимальной величины третьей гармоники тока в нулевом проводнике при подключении фильтра на различных этажах (рисунок 2). Значение тока третьей гармоники в нулевом проводнике на графике показано в процентах от максимального при подключении ФТНП возле трансформатора.

Из рисунка 2 видно, что установка фильтра на 16 этаже позволит наиболее эффективно разгрузить нулевой проводник шинопровода от тока третьей гармоники. Следует отметить, что для других параметров сети и фильтра зависимость на рисунке 2 будет иметь другой вид. Как видно из формул, величина $I_{MAX(q)}^*$ не зависит от величины тока этажа здания, из чего следует, что положение точки в сети, при присоединении к которой ФТНП будет обладать наибольшей эффективностью для разгрузки нулевого проводника от q -той гармоники, не зависит от доли нелинейных нагрузок.

Для найденной точки присоединения фильтра к сети построим графики величины третьей гармоники тока на межэтажных участках (рисунок 3). Величина тока на графике указана в относительных единицах, $I_{M\Delta(q)}^* = |I_{M\Delta(q)}| / |I_{\Delta(q)}|$.

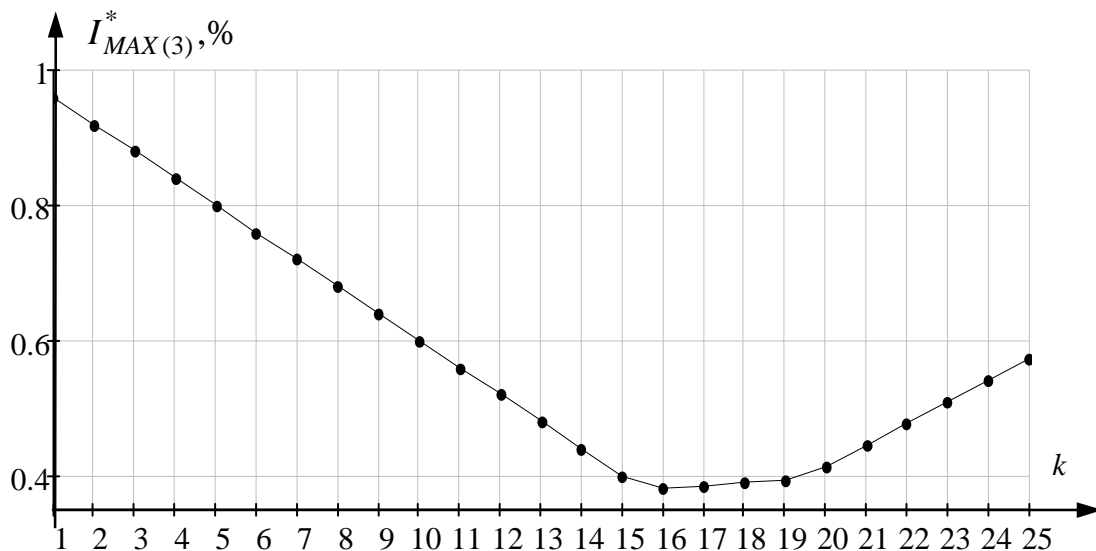


Рис. 2. Зависимость тока третьей гармоники в нулевом проводнике от этажа размещения фильтра

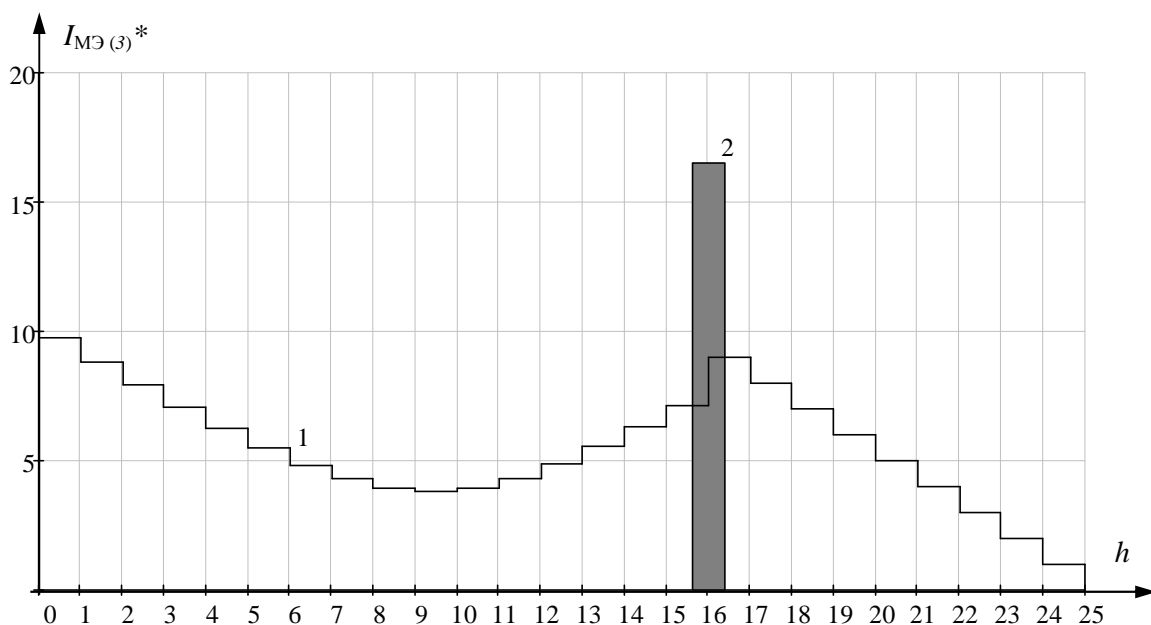


Рис. 3. Величина тока третьей гармоники в нулевом проводнике шинпровода на междуэтажных участках: 1 – при установке ФТНП на 16 этаже; 2 – ток третьей гармоники в фильтре

Из рисунка 3 видно, что при установке фильтра на 16 этаже удается уменьшить величину третьей гармоники тока на участке от трансформатор-фильтр более, чем в 2 раза. Как видно из рисунка, при установке ФТНП не образуется явного токораздела (точка в сети, находящаяся между трансформатором и ФТНП, для которой характерен нулевой ток в нулевом проводе, а по краям ток направлен в разные стороны: слева ток течет в трансформатор, справа – только в ФТНП). Это происходит из-за того, что комплексные сопротивления токам НП трансформатора и фильтра обладают различными углами.

Определение точки присоединения фильтра к сети для уменьшения искажений напряжения, вызванных гармониками тока НП

Уменьшение искажения напряжения при подключении к сети ФТНП можно оценивать исходя из величины напряжения каждой гармоники $U_{(q)}$ или величины коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения, вызывающего гармоники тока.

Запишем напряжения гармоник НП на распределительном щите каждого этажа здания (ЭРЩ):

$$U_{\text{ЭРЩ}(q)}(h) = I_{T(q)} \cdot (Z_{T(q)} + Z_{K(q)}) + \sum_{n=2}^h I_{MЭ(q)} \cdot Z_{Э(q)}, \quad (8)$$

где h – номер этажа здания.

В значении коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения наибольший и определяющий вклад среди гармоник НП вносит третья гармоника. Поэтому улучшение качества напряжения можно оценить по величине напряжения третьей гармоники. Для рассмотренного выше высотного здания по формулам (1)-(10) построим зависимость максимального по этажам здания напряжения третьей гармоники (рисунок 4). На графике напряжение $U^*_{\text{ЭРЩ}(3)}$ представлено в процентах от максимального напряжения при установке ФТНП непосредственно возле трансформатора.

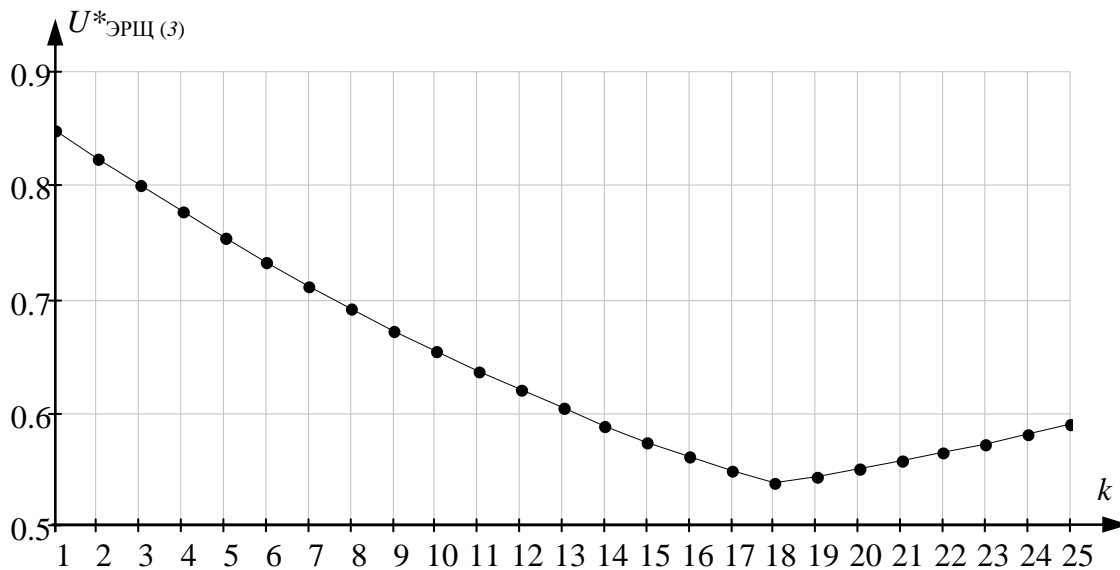


Рис. 4. Изменение третьей гармоники напряжения в зависимости от этажа, на котором может подключаться фильтр

Из рисунка 4 видно, что за счет изменения места установки ФТНП можно значительно повысить его эффективность. Таким образом, для наиболее эффективного снижения напряжения третьей гармоники необходимо размещать ФТНП на 18 этаже, при этом максимальное значение третьей гармоники напряжения может быть уменьшено на 40 и более процентов. Однако следует отметить, что при увеличении качества электрической энергии происходит увеличение токов гармоник. Поэтому эффект может быть значительно ниже.

Изменение потерь, вызванных токами нулевой последовательности, при присоединении фильтра токов нулевой последовательности к сети

При выборе места присоединения ФТНП к распределительной сети важно учитывать изменение потерь электроэнергии, вызванных гармониками тока.

Потери в сети от гармоник НП при отключенном ФТНП от сети:

$$\Delta P_{\text{безФ}(q)} = \Delta P_{\text{Ш}(q)} + \Delta P_{T(q)}, \quad (9)$$

где $\Delta P_{\text{Ш}(q)}$ – потери в шинном проводе; $\Delta P_{T(q)}$ – потери в трансформаторе.

Потери в сети от гармоник НП при установке одного ФТНП:

$$\Delta P_{(q)} = \Delta P_{\text{Ш}(q)} + \Delta P_{T(q)} + \Delta P_{\text{Ф}(q)}, \quad (10)$$

где $\Delta P_{\text{Ф}(q)}$ – потери в фильтре.

Величину потерь от гармоник НП можно определить для выше оговоренного приближения: нагрузки на этажах одинаковы и равномерно распределены по фазам. Таким образом, из условия ортогональности синусоидальных функций потери в сети от гармоник НП при отключенном ФТНП от сети:

$$\Delta P_{\text{без}\Phi(q)} = \sum_{n=2}^m |I_{M\Phi(q)}(n)|^2 \cdot R_{\Sigma} + |I_{T(q)}|^2 \cdot (R_T + R_K). \quad (11)$$

Потери в сети от гармоник НП при установке одного ФТНП:

$$\Delta P_{(q)} = \sum_{n=2}^m |I_{M\Phi(q)}(n)|^2 \cdot R_{\Sigma} + |I_{T(q)}|^2 \cdot (R_T + R_K) + |I_{\Phi(q)}|^2 \cdot R_{\Phi}. \quad (12)$$

Особый интерес вызывает величина изменения потерь в сети при установке ФТНП $\Delta P_{(q)}^* = \Delta P_{(q)} / \Delta P_{\text{без}\Phi(q)} \cdot 100\%$. Для рассмотренного высотного здания построим величину изменения потерь в сети, вызванных третьей гармоникой НП в зависимости от этажа размещения ФТНП (рисунок 5). Необходимо отметить, что данный подход не учитывает изменение тока нелинейных потребителей при изменении качества и амплитуды напряжения при установке ФТНП. При учете увеличения тока нелинейными нагрузками при улучшении качества напряжения величина потерь увеличится.

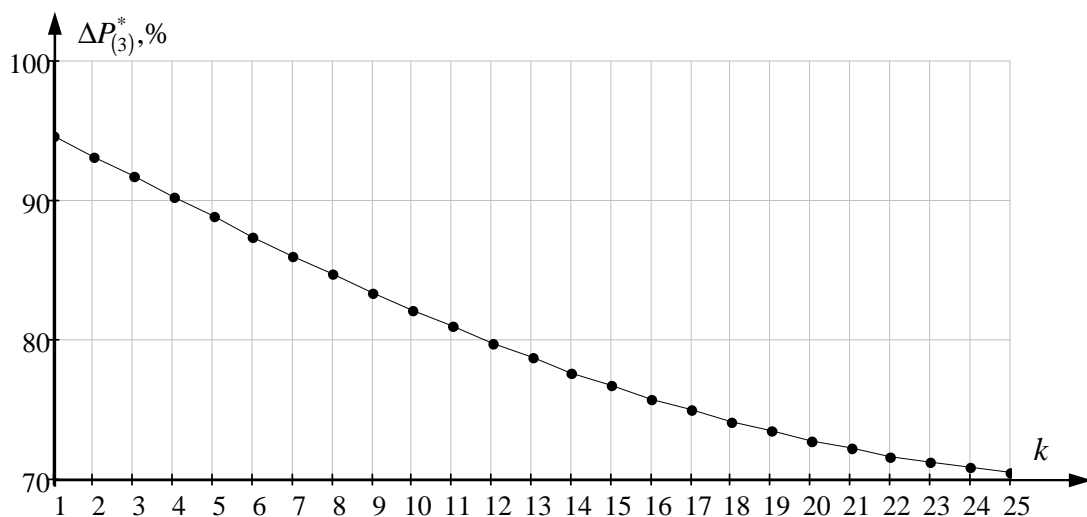


Рис. 5. Изменение потерь в сети, вызванных третьей гармоникой тока НП, в зависимости от места установки ФТНП

Из рисунка 5 видно, что наименьшие потери в сети будут при установке фильтра на верхнем этаже. Необходимо отметить, что при установке фильтра не всегда наблюдается уменьшение потерь. Поэтому при многокритериальной оценке важно учитывать величину изменения потерь.

Приведенные в статье рассуждения и расчеты можно повторить для других конструкций распределительной сети (наличия двух и более стояков), а также для случая установки в здании двух и более ФТНП.

Установка в сети двух ФТНП может быть целесообразна в случаях, если применение двух фильтров меньшей мощности и большего сопротивления токам НП является более дешевым по сравнению с применением одного с большей мощностью и меньшим сопротивлением токам НП или, если один ФТНП не позволяет добиться требуемых значений параметров режима сети.

Выводы

Для высотных административных и офисных зданий предложена методика определения места присоединения ФТНП к сети, в котором фильтр будет обладать наибольшей эффективностью для критериев: фильтрации высших гармоник тока нулевой последовательности; подавления высших гармоник напряжения нулевой последовательности и учета изменения потерь, вызванных токами гармоник нулевой последовательности в распределительной сети.

Список литературных источников

1. Капустин В.М., Лопухин А.А. Компьютеры и трехфазная электрическая сеть //Современные технологии автоматизации – СТА. – № 2. – 1997. – С. 104-108.
2. Шидловский А.К., Кузнецов В.Г. Повышение качества энергии в электрических сетях. – К.: Наук. думка, 1985. – 268 с.
3. Шидловский А.К., Новский В.А., Каплычный Н.Н. Стабилизация параметров электрической энергии в распределительных сетях. – К.: Наук. думка, 1989. – 312 с.
4. Пентегов И.В. Сравнительный анализ трехфазных фильтров токов нулевой последовательности автотрансформаторного и трансформаторного типа /И.В. Пентегов, С.В. Рымар И.В. Волков, В.М. Безручко, Б.Б. Ларченко, Г.С. Кривенко, М. Levin //Технічна електродинаміка: Тем. випуск. Проблеми сучасної електротехніки, Ч. 3. – К.: ІЕД НАНУ, 2008. – С. 49-56.
5. Росс Д. Проектирование систем ОВК высотных общественных многофункциональных зданий /Дональд Росс. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2004. – 166 с. – Перевод изд.: HVAC Design Guide for Tall Commercial Buildings /Donald E. Ross. Atlanta, 2004.
6. Шидловский А.К., Жаркин А.Ф. Высшие гармоники в низковольтных электрических сетях. – К.: Наукова думка, 2005. – 210 с.
7. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 160 с.
8. Беляев А.В. Выбор аппаратуры, защит и кабелей в сетях 0,4 кВ. – Л.: Энергоатомиздат Ленингр. отд-ние, 1988. – 176 с.
9. Межгосударственный стандарт ГОСТ 28249-93. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ
10. Technical Data Sheet. for Neutral Current Eliminator of MIRUS International Inc. – 2005. Режим доступа [http://www.mirusinternational.com/downloads/NCE-S001-B6%20\(NCE%20Tech%20Sheet\).pdf](http://www.mirusinternational.com/downloads/NCE-S001-B6%20(NCE%20Tech%20Sheet).pdf)