

УДК 621.314

### СНИЖЕНИЕ ПОТЕРЬ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В СЕТЯХ НИЗКОГО НАПРЯЖЕНИЯ С ВЫПРЯМИТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКОЙ

**А.Ф. Жаркин**, чл.-корр. НАН Украины, **В.А. Новский**, докт.техн.наук, **Н.Н. Каплычный**, канд.техн.наук, **А.В. Козлов**, канд.техн.наук, **Д.А. Малахатка**  
Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина, e-mail: novsky@ied.org.ua

*Рассмотрен один из способов снижения потерь активной мощности в сетях низкого напряжения путем подключения выпрямительной нагрузки к искусственной нулевой точке, которая создается с помощью силовых фильтров токов нулевой последовательности. При этом благодаря их конструктивным особенностям обеспечивается не только существенное снижение потерь активной мощности в низковольтных распределительных сетях, но и значительное повышение качества электроэнергии у потребителей. Библи. 8, рис. 7.*

**Ключевые слова:** сеть низкого напряжения, потери активной мощности, фильтр нулевой последовательности, искусственная нулевая точка, качество электрической энергии.

**Общая характеристика проблемы.** При построении современных универсальных систем электроснабжения ответственных потребителей электроэнергии следует учитывать возможность выполнения локальных электрических сетей (ЛЭС) низкого напряжения (НН) трех- и четырехпроводными. Поэтому необходимо предусматривать возможность создания искусственного нулевого провода (искусственной нейтрали) с помощью силовых фильтров токов нулевой последовательности (ФТНП). В работах [2, 3, 7] показано, что подключение нагрузки в ЛЭС по схеме с искусственной нулевой точкой (ИНТ) позволяет не только достичь высокого качества электрической энергии у потребителя, но и существенно снизить потери активной мощности в сети, а в ряде случаев – обеспечить выполнение требований электробезопасности потребителей в ЛЭС [5].

Следует отметить, что предыдущие исследования позволили определить лишь качественную сторону выявленных положительных эффектов в основном за счет результатов анализа несимметричных режимов предложенной электрической системы [2]. Поэтому целесообразно исследовать работу ЛЭС с ИНТ при подключении к ней как отдельных электрических потребителей, так и различных (типовых) комбинаций потребителей, характерных для различных сельских территорий, причем особенностью таких сетей НН является их насыщенность однофазными нелинейными электроприемниками, в первую очередь, устройствами преобразовательной техники и двигательными нагрузками [3, 6-8].

**Целью работы** является исследование практических аспектов снижения потерь активной мощности в сетях НН путем введения ФТНП для создания ИНТ при подключении однофазных выпрямительных нагрузок в ЛЭС с искусственной нейтралью.

**Предлагаемый подход к решению проблемы** снижения потерь активной мощности в электрических сетях НН заключается в организации ИНТ при подключении к низковольтной сети ЛЭС нелинейных электроприемников, в частности, мощных однофазных выпрямителей. Поскольку входной ток выпрямителя с емкостным фильтром имеет ярко выраженный импульсный характер с большим содержанием высших гармоник, подключение указанных выпрямителей к сети НН приводит к существенному увеличению тока в нулевом проводе.

В то же время очевидно, что рассматриваемые режимы будут иметь свои отличительные особенности, в первую очередь, учитывая сложный характер формирования кривых нагрузочных токов. При проведении анализа потребуются принятие определенных упрощений и допущений, которые позволят проводить сравнение значений потерь активной мощности в различных режимах подключения выпрямительной нагрузки. При этом расчеты потерь активной мощности будем производить с использованием действующих значений импульсных нагрузочных токов в соответствии с известным правилом соотношения действующих значений токов одинаковой формы, исходя из количества импульсов и величины их мгновенных значений (далее – *правило действующих значений* [1]).

Анализ потерь активной мощности выполнен для случая, когда используется типовая трехфазная четырехпроводная сеть, состоящая из силового трансформатора 10/0,4 кВ с соединением вторичных обмоток по схеме «звезда-звезда с нулем» мощностью, например, 100 кВА и отходящей трехфазной линией с расчетной нагрузкой, равной 1/3 мощности силового трансформатора.

При этом выпрямительная нагрузка выбрана симметричной по фазам и ее доля не превышает 30% от суммарной нагрузки линии, т.е. около 11 кВА. Исследование же потерь активной мощности, когда мощности однофазных выпрямительных нагрузок, подключенных к разным фазам трехфазной сети, являются неодинаковыми, представляет собой отдельную достаточно сложную задачу.

Анализ проведем вначале для случая, когда к трехфазной сети с нулевым проводом подключен один однофазный мостовой выпрямитель с емкостным фильтром (рис. 1). Здесь  $A, B, C$  – зажимы источника трехфазной симметричной системы напряжений;  $TP$  – питающий трансформатор;  $R_L, R_{Ha}$  – сопротивления фазного (нулевого) провода линии и нагрузки выпрямителя;  $C_{Ha}$  – емкость фильтра выпрямителя;  $i_A, i_0$  – мгновенные значения тока фазного и нулевого проводов соответственно. Данный режим сети характеризуется максимально возможной несимметрией нагрузки и наибольшими из возможных потерями активной мощности в линии из-за наличия сопротивления  $R_0$  нулевого провода, которое принято равным активному сопротивлению фазного провода линии  $R_L$ .

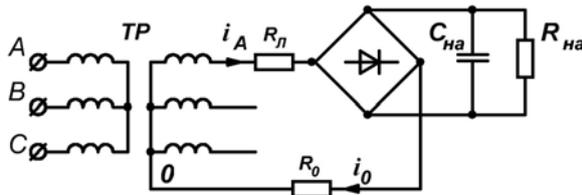


Рис. 1

На рис. 2 показаны известные временные диаграммы входного тока  $i_A$  однофазного мостового выпрямителя с емкостным фильтром, который протекает в линейном проводнике фазы  $A$  трехфазной сети за полупериод соответствующего фазного напряжения. Допустим, что его амплитудное значение составляет  $K$  относительных единиц (о.е.), а угол отсечки (длительность импульса)  $\Theta = \pi/3$ . Очевидно, что такой же ток  $i_0$  будет протекать и в нейтральном проводнике рассматриваемой сети.

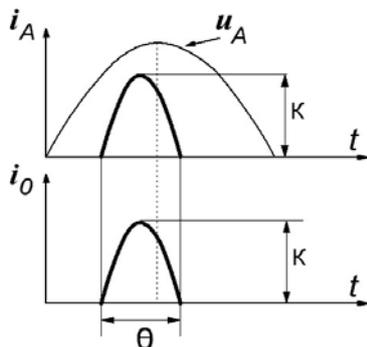


Рис. 2

Определим потери активной мощности сети в указанных проводниках. При анализе режимов перейдем к действующим значениям рассматриваемых токов, считая при этом, что действующие значения токов пропорциональны амплитудным значениям и составляют  $F$  о.е. Предположим, что значения активных сопротивлений проводников одинаковы и составляют одну о.е. Тогда потери активной мощности в рассматриваемой сети будут пропорциональны удвоенному квадрату действующего значения тока, протекающего через линейный и нейтральный проводники. В результате суммарные потери активной мощности составят  $P_{\Pi} = 2F^2$  о.е.

Проанализируем работу однофазного мостового выпрямителя при его подключении к локальной электрической сети с искусственной нейтралью, созданной с помощью фильтра токов нулевой последовательности (ФТНП), например, с электромагнитными связями (рис. 3).

На рис. 3 обозначено:  $0^l$  – искусственная нулевая точка;  $i_a$  и  $i_0^l$  – мгновенные значения входного тока рассматриваемого выпрямителя и тока искусственной нейтрали соответственно.

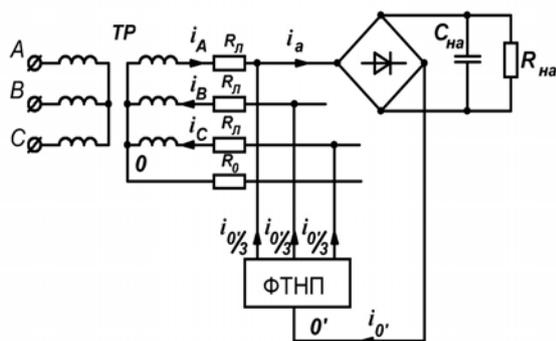


Рис. 3

Для проведения сравнительного анализа изменения значения потерь активной мощности сети в этом случае примем, что входной ток рассматриваемого выпрямителя будет иметь такую же форму и длительность, как и в предыдущем случае, а его амплитудное значение также равно  $K$  о.е. При таком способе создания искусственной нулевой точки через ФТНП протекают три одинаковых тока, любое мгновенное значение которых равно 1/3 любого мгновенного значения тока в нейтрали локальной сети. При этом в соответствии с правилом действующих значений дейст-

вующее значение тока в линейном проводнике фазы  $A$  основной сети составит  $2/3$  от действующего значения тока, протекающего в искусственной нейтрали локальной сети  $I_A=(2/3) \cdot F$ . Действующие значения токов в фазах  $B$  и  $C$ , но протекающих в противоположном направлении, равны  $I_B = I_C = (1/3) \cdot I_0 = (1/3) \cdot F$ . На рис. 4 показаны временные диаграммы указанных токов для этого случая.

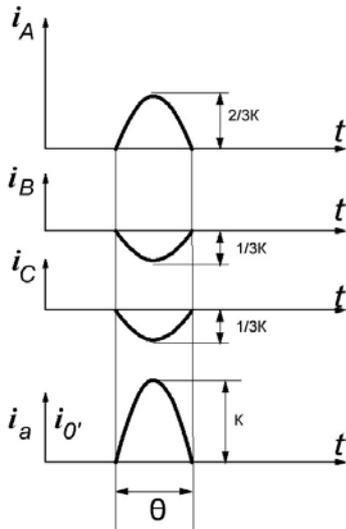


Рис. 4

В результате суммарные потери активной мощности, пропорциональные квадратам действующих значений токов  $I_A, I_B, I_C$ , в данном случае составят  $P_{\Pi} = [(2/3) \cdot F]^2 + [(1/3) \cdot F]^2 + [(1/3) \cdot F]^2 \approx 0,67F^2$  о.е. В предыдущем случае потери активной мощности составили  $P_{\Pi} = 2F^2$  о.е. Таким образом, при подключении однофазной выпрямительной нагрузки к ЛЭС с искусственной нейтралью потери активной мощности в основной сети в три раза меньше, чем при подключении указанной нагрузки к сети с нулевым проводом.

Очевидно, что трехкратное уменьшение потерь в основной сети получено без учета потерь в четырехпроводной локальной системе с ФТНП. Уменьшения указанных потерь можно достичь путем создания конструкции локальной системы с минимально возможными длинами проводников большого сечения. При этом потерями в рассматриваемых ФТНП, которые, как известно, на порядок меньше потерь в трансформаторных устройствах соизмеримой установленной мощности, можно пренебречь.

Следует отметить, что в реальных условиях эксплуатации выпрямительная нагрузка, как правило, является определенной частью суммарной нагрузки. При этом с точки зрения определения тока в нулевом проводе подключение однофазной выпрямительной нагрузки

аналогично подключению однофазной активной нагрузки. Поэтому наличие нелинейной составляющей нагрузки не приведет к изменению режима максимально возможной несимметрии при подключении однофазной нагрузки и наибольшим потерям активной мощности в линии четырехпроводной сети.

В связи с этим можно сделать вывод, что при подключении к трехфазной сети однофазной нагрузки, имеющей в своем составе линейную и нелинейную составляющую, независимо от величины доли нелинейной нагрузки потери активной мощности в линии в сетях с ИНТ будут в 2,5–3,0 раза меньше, чем в сетях с нулевым проводом. Кроме того, как было отмечено ранее, при использовании ФТНП обеспечивается высокое качество электроэнергии в сетях НН с однофазными электроприемниками, в первую очередь, радиоэлектронной и компьютерной аппаратурой, которая является характерной нелинейной нагрузкой указанных сетей.

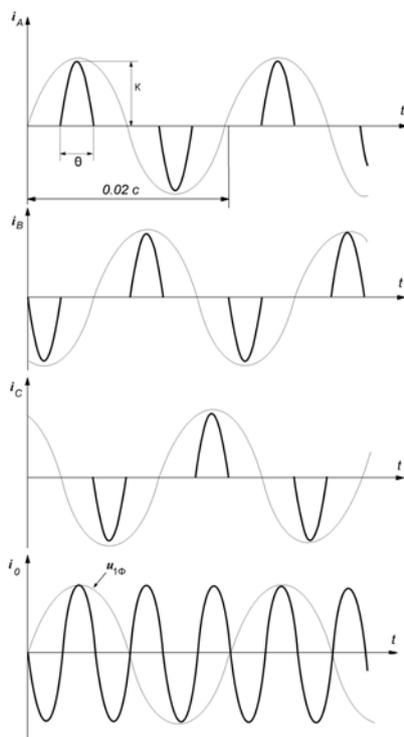


Рис. 5

Проведем аналогичный анализ для случая, когда к трехфазной сети с нулевым проводом подключено три однотипные однофазные выпрямительные нагрузки (без ФТНП). Временные диаграммы изменения мгновенных значений токов в фазных  $i_A, i_B, i_C$  и нулевом  $i_0$  проводах основной сети при таком способе подключения выпрямительных нагрузок представлены на рис. 5. Считаем, что амплитудные значения и длительность импульсов указанных токов известны из предыдущего анализа. При этом временная диаграмма тока в фазном проводе  $i_A$  (рис. 5) будет соответствовать временной диаграмме тока в линейном проводнике фазы  $A$  (рис. 2), а аналогичные временные диаграммы токов  $i_B, i_C$  будут сдвинуты относительно диаграммы тока  $i_A$  на  $1/3$  периода питающего напряжения.

Из представленного рисунка видно, что временная диаграмма тока в нулевом проводе сети  $i_0$  представляет собой кривую, изменяющуюся с частотой третьей гармоники фазного напряжения питающей сети. Другими словами, кривая тока  $i_0$  на полупериоде питающего напряжения состоит из трех одинаковых импульсов, амплитуда и форма которых определяются кривыми фазных токов.

В рассматриваемом режиме потери активной мощности будут состоять из суммы потерь в линейных проводниках от трех од-

нофазных выпрямительных нагрузок, а также потерь в нейтральном проводнике сети. При этом в соответствии с правилом действующих значений действующее значение тока в нейтральном проводнике может достигать  $F \cdot \sqrt{3}$ . Тогда потери активной мощности в сопротивлениях линейных проводников рассматриваемой сети будут равны  $P_{\Pi} = 3F^2$ , а суммарные потери с учетом сопротивления нейтрального проводника для этого случая составят  $P_{\Pi} = 6F^2$  о.е.

Проведем анализ для случая, когда три рассматриваемые выпрямительные нагрузки подключены к локальной сети с искусственной нейтралью. Для этого с учетом имеющихся аналогий с рассмотренными ранее трехфазными несимметричными нагрузочными режимами применим методику, предложенную в [2]. Соответствующая схема подключения для этого случая аналогична приведенной на рис. 3 (при допущении равенства активных нагрузок выпрямителей). При такой схеме подключения ФТНП сеть состоит из двух подсистем: основной трехфазной трехпроводной (участок сети между зажимами источника электроэнергии и местом подключения ФТНП) и локальной трехфазной четырехпроводной (участок от места подключения ФТНП до места подключения трех однофазных выпрямительных нагрузок, в том числе, к искусственной нейтральной точке  $0'$ , создаваемой ФТНП), учитывая, что нейтральные точки питающего трансформатора ( $0$ ) и ФТНП ( $0'$ ) – эквипотенциальны [3, 4]. Очевидно, что анализируемый режим – трехфазный нагрузочный можно рассматривать как сумму трех соответствующих однофазных нагрузочных режимов. В этом случае временные диаграммы токов  $i_a, i_b, i_c$  в четырехпроводной части сети будут аналогичны соответствующим временным диаграммам рассмотренного выше трехфазного режима без подключения ФТНП (рис. 5).

В то же время, временные диаграммы токов  $i_A, i_B, i_C$  в основной сети будут получены путем наложения соответствующих диаграмм токов однофазных режимов (для указанного режима фазы  $A$  приведены на рис. 4) с учетом их направления и фазового сдвига. Указанные временные диаграммы рассматриваемых токов  $i_A, i_B, i_C$  показаны на рис. 6, из рассмотрения которого видно, что кривая каждого из токов фаз основной сети  $i_A, i_B, i_C$  на полупериоде питающего напряжения представляет совокупность трех импульсов соответствующих токов, представленных на рис. 4. Очевидно, что потери активной мощности в каждой фазе основной сети будут такими же, как и в рассмотренном выше случае однофазного подключения,  $P_{\Pi} = [(2/3) \cdot F]^2 + [(1/3) \cdot F]^2 + [(1/3) \cdot F]^2 \approx 0,67F^2$ . В результате суммарные потери активной мощности при подключении трех выпрямительных нагрузок  $P_{\Pi} = 2F^2$  о.е. В то же время для сети без искусственной нейтрали указанные потери активной мощности составили бы  $P_{\Pi} = 6F^2$  о.е.

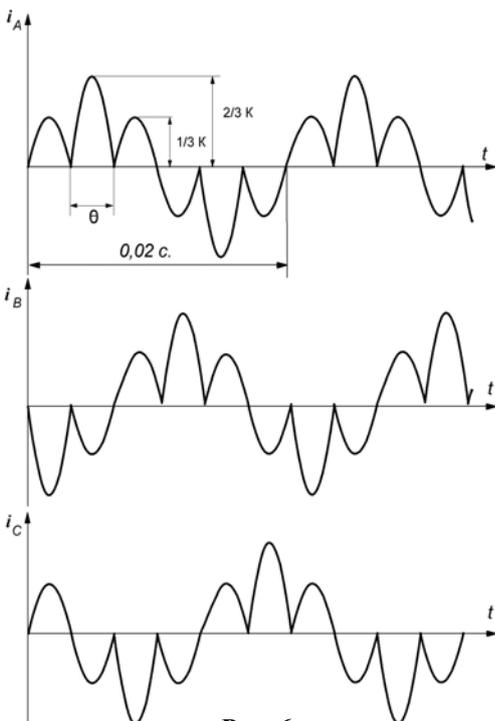


Рис. 6

Таким образом, при подключении выпрямительной нагрузки к трем фазам ЛЭС с искусственной нейтралью, созданной с применением ФТНП, потери активной мощности в основной сети в три раза меньше, чем при подключении указанной нагрузки к сети с нулевым проводом.

Для проверки правильности таких рассуждений было проведено физическое моделирование рассматриваемого режима. На рис. 7 представлена осциллограмма тока одной из фаз основной сети, показанной на рис. 3, в случае подключения трех однофазных выпрямителей, которая получена с помощью физической модели локальной сети с масштабированием 1:10 значений соответствующих параметров элементов типовой трехфазной сети с трансформатором мощностью 100 кВА по отношению к их реальным величинам.

Экспериментальная кривая фазного тока, показанная на рис. 7, соответствует кривым, имеющим место при подключении мощной выпрямительной нагрузки к источнику конечной мощности. Сравнение теоретических кривых (рис. 6) и реальной осциллограммы физической модели (рис. 7) подтверждает адекватность результатов проведенного анализа.

Следует отметить, что при подключении к трем фазам четырехпроводной сети выпрямительной нагрузки ток в нулевом проводе будет больше, чем при подключении трехфазной активной нагрузки той же мощности за счет токов высших гармоник нулевой последовательности. В основном, именно поэтому (без учета влияния изменения формы кривых токов в фазных проводах) при «исключении»

чении» нулевого провода путем создания локальной сети с ИНТ в случае подключения к такой сети

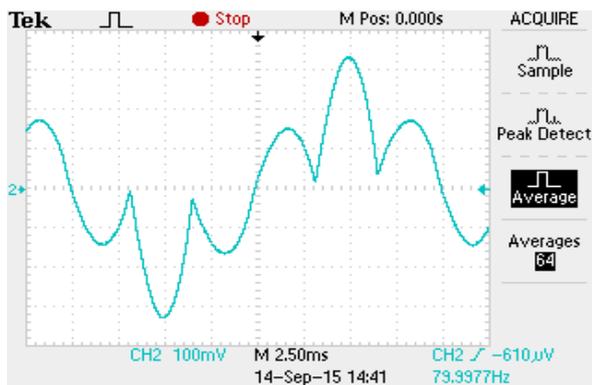


Рис. 7

родских распределительных сетей НН показал [7], что в настоящее время эта доля составляет примерно 25–40% от суммарной нагрузки указанных сетей (что соответствует степени наполнения современного офисного центра компьютерами, оргтехникой, энергосберегающими осветительными приборами и др.). Следовательно, суммарные потери активной мощности в такой сети с ИНТ будут примерно на 25–30% меньше, чем в традиционной четырехпроводной сети. Таким образом, подключение потребителей к локальной сети с использованием ФТНП является весьма эффективным способом снижения потерь активной мощности в низковольтных сетях с нелинейными нагрузками.

Рассмотренную локальную электрическую сеть целесообразно использовать при модернизации и реконструкции низковольтных распределительных сетей Украины, которые значительно изношены и требуют незамедлительной замены или капитального ремонта. При этом, например, в случае частичного изменения существующих ступеней трансформации высоковольтного напряжения при неизменной оконечной ступени сети, рассмотренная ЛЭС достаточно просто и с относительно малыми капитальными затратами может быть «встроена» в существующие сети низкого напряжения.

**Выводы.** 1. В результате сравнительного анализа изменения потерь активной мощности в различных режимах работы низковольтной сети с ИНТ при подключении нелинейной (выпрямительной) нагрузки показано, что рассмотренные режимы имеют свои отличительные особенности, в частности, вызванные сложным характером формирования кривых нагрузочных токов, что потребовало при проведении расчетов указанных потерь использования правила соотношения действующих значений токов одинаковой формы, исходя из количества импульсов и величины их мгновенных значений.

2. Установлено, что наличие нелинейной составляющей нагрузки не вызывает изменения режима максимально возможной несимметрии однофазной суммарной нагрузки и наибольших потерь активной мощности в линии четырехпроводной сети. Поэтому при ее подключении независимо от величины доли нелинейной нагрузки потери активной мощности в линии в сетях с ИНТ более, чем в 2,5 раза меньше, чем в сетях с нулевым проводом.

3. Установлено, что при подключении к локальной сети с ИНТ трехфазной выпрямительной нагрузки потери активной мощности в основной сети снижаются гораздо существеннее (в 3 раза), чем при подключении несимметричной трехфазной активной нагрузки (примерно на 10%). Очевидно, что при наличии линейной и нелинейной составляющих в составе суммарной нагрузки соотношение их мощностей будет определять эффективность предлагаемого способа снижения потерь активной мощности, т.е. чем больше доля нелинейной нагрузки, тем выше его эффективность.

4. Показано, что при подключении трехфазной суммарной нагрузки с обычной для современных городских распределительных сетей НН долей нелинейной нагрузки 25–40% суммарные потери активной мощности в локальных сетях с ИНТ будут примерно на 25–30% меньше, чем в традиционных четырехпроводных сетях НН.

5. Полученные результаты свидетельствуют о высокой эффективности рассмотренного способа снижения потерь активной мощности в сетях НН в случае подключения нагрузок, имеющих в своем составе существенную нелинейную составляющую. Рассмотренную локальную электрическую сеть целесообразно использовать при модернизации и реконструкции распределительных сетей Украины, причем она достаточно просто и с относительно малыми капитальными затратами может быть «встроена» в существующие сети низкого напряжения.

1. Векслер Г.С. Электропитание спец аппаратуры. – К.: Вища школа, 1975. – 376 с.
2. Жаркин А.Ф., Капличный Н.Н., Новский В.А., Козлов А.В. Снижение потерь активной мощности в сетях низкого напряжения с помощью силовых фильтров токов нулевой последовательности // Электрические сети и системы. – 2015. – № 1. – С. 45–51.
3. Жаркин А.Ф., Новский В.А., Капличный Н.Н., Козлов А.В., Малахатка Д.А. Особенности работы низковольтных локальных сетей в неполнофазных и аварийных режимах // Техн. электродинамика. – 2012. – № 3. – С. 31–33.
4. Патент України № 97162 МКП Н 02J 3/26, G05F 1/26, G05F 1/14. Застосування фільтра струмів нульової послідовності основної та вищих гармонік як перетворювача параметрично врівноважених режимів багатофазних напруг та струмів / Музиченко О.Д., Музиченко Ю.О. Опубліковано 10.01.2012. Бюл. № 1.
5. Правила улаштування електроустановок. – Х.: Мінергерговугілля України, 2014. – 808 с.
6. Сиротин Ю.А. Структурное разделение процессов в трехфазной четырехпроводной цепи и компенсация токов нейтрали // Электротехника і електромеханіка. – 2012. – Випуск 6. – С. 66–70.
7. Шидловский А.К., Жаркин А.Ф. Высшие гармоники в низковольтных электрических сетях. – К.: Наукова думка, 2005. – 210 с.
8. Jou H.-L., J.-C. Wu, K.-D. Wu, W.-J. Chiang. Usis of zig-zag Transformer applying in the three-phase tribution power system // IEEE Trans. Power Del. – 2005. – Vol. 2. – Pp. 1168–1173.

УДК 621.314

### **ЗМЕНШЕННЯ ВТРАТ АКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В МЕРЕЖАХ НИЗЬКОЇ НАПРУГИ З ВИПРЯМНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ**

**А.Ф. Жаркін**, чл.-кор. НАН України, **В.О. Новський**, докт.техн.наук, **Н.М. Капличний**, канд.техн.наук, **О.В. Козлов**, канд.техн.наук, **Д.О. Малахатка**

**Інститут електродинаміки НАН України, пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна, e-mail: novsky@ied.org.ua**

*Розглянуто один із способів зменшення втрат активної потужності в мережах низької напруги шляхом підключення випрямного навантаження до штучної нульової точки, яка створюється за допомогою силових фільтрів струмів нульової послідовності. При цьому завдяки їхнім конструктивним особливостям забезпечується не тільки істотне зниження втрат активної потужності в низьковольтних розподільчих мережах, але і значне підвищення якості електроенергії у споживачів. Бібл. 8, рис. 7.*

**Ключові слова:** розподільча мережа низької напруги, втрати активної потужності, фільтр нульової послідовності, штучна нульова точка, якість електричної енергії.

### **REDUCTION OF ACTIVE POWER LOSSES IN LOW VOLTAGE NETWORKS WITH THE RECTIFIER LOAD**

**A.F. Zharkin, V.A. Novskiy, N.N. Kaplychnyi, A.V. Kozlov, D.A. Malahatka**

**Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,**

**pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine, e-mail: novsky@ied.org.ua**

*One of the methods of active power losses reducing in the low voltage network by connecting rectifier load to artificial zero point, which is created using a power zero sequence filters is considered. The special design of filters provides not only a essential reduction in active power losses in the low voltage distribution network, but also a significant improvement of power quality for consumers. References 8, figures 7.*

**Key words:** low voltage network, power losses, filter zero sequence, artificial neutral, power quality.

1. Veksler H.S. Power supply of special equipment. – Kyiv: Vyshcha shkola, 1975. – 376 p. (Rus)
2. Zharkin A.F., Kaplychnyi N.N., Novskiy V.A., Kozlov A.V. Reduction of losses of active power in low voltage power via the zero sequence current filters // Elektricheskie seti i sistemy. – 2015. – No 1. – Pp. 45–51. (Rus)
3. Zharkin A.F., Novskiy V.A., Kaplychnyi N.N., Kozlov A.V., Malahatka D.A. Features of work of low voltage local networks in open-phase operating conditions and malfunctions // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2012. – No 3. – Pp. 31–33. (Rus)
4. Patent Ukrainy No 97162 МКП N 02J 3/26, G05F 1/26, G05F 1/14. The use of zero sequence current filter fundamental and higher harmonics, as an converter of parametric-balanced mode multiphase voltages and currents / Muzychenko O.D., Muzychenko Yu.O. Opublikovano 10.01.2012. Biul. No 1. (Ukr)
5. Rules for electrical installation. – Kharkiv: Minenerhovuhillia Ukrainy, 2014. – 808 p. (Ukr)
6. Syrotyn Yu.A. Structural separation processes in the three-phase four-wire circuit and compensation currents in the neutral // Electrical engineering & Electromechanics. – 2012. – Vypusk 6. – Pp. 66–70. (Rus)
7. Shydlovskii A.K., Zharkin A.F. Higher harmonics in low-voltage electrical networks. – Kyiv: Naukova dumka, 2005. – 210 p. (Rus)
8. Jou H.-L., J.-C. Wu, K.-D. Wu, W.-J. Chiang. Usis of zig-zag Transformer applying in the three-phase tribution power system // IEEE Trans. Power Del. – 2005. – Vol. 2. – Pp. 1168–1173.

Надійшла 02.02.2017

Остаточний варіант 24.03.2017