

**Ozorowski Marek, Jałozza Roman – Ensto Pol Sp. z o.o.**

**Перевод и техническое редактирование**

**Ян Штефунык – ООО «КИЦ ПУЭ-21»**

## **Улучшение качественных параметров питающей сети низкого напряжения (нн) при большой концентрации микроинсталляций солнечных электростанций (МСЭС) и зарядных станций электромобилей EVC**

### **Вступление**

В последние годы установки возобновляемой энергии, в частности бытовые фотоэлектрические (PV) источники, находятся в фазе быстрого расширения. Увеличение насыщенности солнечных фотоэлектрических установок в сетях низкого напряжения является результатом фундаментальных изменений на рынке электроэнергии и растущих экологических проблем, связанных с глобальным потеплением. Кроме того, глобальные тенденции, такие как развитие электромобильности, становятся реальностью, и операторы распределительных систем должны решать новые задачи, связанные с повышенным спросом на энергию и динамически изменяющимися нагрузками и растущей нестабильностью в электросети.

### **Качество электроэнергии в сетях низкого напряжения**

На определение качества электроэнергии влияет набор параметров, описывающих характеристики процесса подачи энергии пользователю при нормальных условиях эксплуатации. Описанные параметры характеризуют напряжение питания и определяют условия непрерывности подачи к потребителю. Очень важно знать, что на качество электроэнергии влияют как поставщики, так и потребители энергии. Поставщики, то есть операторы распределительной системы, в связи с используемыми сетями питания с определенной нагрузочной способностью и жесткостью напряжения питания, несут основную ответственность за параметры напряжения. С другой стороны, потребители, то есть потребители, подключенные к электросети, оказывают существенное влияние на качество электроэнергии за счет работы (в основном нескоординированной) однофазных электрических приемников, что может ухудшить качество электроэнергии

В Польше правовые нормы, определяющие качественные параметры напряжения питания, указаны в:

- стандарте PN-EN 50160: 2010 - относительно параметров напряжения питания в распределительных сетях общего пользования,
- Инструкции по эксплуатации и использованию распределительной сети данного оператора,
- Распоряжении министра экономики о подробных условиях эксплуатации энергосистемы.

В число основных параметров, характеризующих качество распределенной электроэнергии, входят величины, подлежащие процессам стандартизации, такие как:

- стабильность частоты напряжения,
- стабильность напряжения питания (отклонения уровня напряжения в пределах  $\pm 10\% U_n$ ),

- медленные отклонения напряжения от номинального значения,
- внезапные колебания уровня напряжения,
- индикатор мерцания (так называемый flicker ),
- уровень асимметрии напряжения в линиях электропередач,
- уровни гармоник напряжения, поставляемых потребителям.

В последние годы резко возросли проблемы с поддержанием правильных параметров напряжения питания в сетях низкого напряжения, таких как уровни и асимметрия фазных напряжений, провалы напряжения, мерцание и наличие высших гармоник. В настоящее время это относится в основном к воздушным сетям в районах с жилыми строениями низкой плотности. Часто это сети, построенные во второй половине прошлого века с небольшими поперечными сечениями кабеля и длинными питающими линиями. Миграция и изменения места проживания населения также значительны. По данным Евростата, процент людей, переезжающих в дома на окраинах городов, за период 2005–2016 годов увеличился с 49,5% до более 55,8%. С ростом миграции величина потребления энергии в домах на одну семью увеличивается. Обычно это устройства (стиральные машины, сушилки, электрические плиты, индукционные плиты, тепловые насосы, зарядные устройства), подключенные некоррелированным образом на отдельных фазах и включаемые случайным образом, а также устройства небольших производственных компаний, подключенные к сети низкого напряжения. Анализ среднегодового потребления электроэнергии в односемейных домах показывает потребление в 3–8 МВтч (около 300–650 кВтч в месяц), которая значительно возрастет в ближайшем будущем в связи с ростом числа электромобилей, заряжаемых от домашней сети низкого напряжения. Все эти факторы вызывают рост явлений асимметрии нагрузки, напряжения и нестабильности в сети низкого напряжения, что, по мнению авторов, станет одной из основных задач, которые ожидают операторов распределительных систем при управлении сетями низкого напряжения.

## **Симметризирующий трансформатор – метод стабилизации сети низкого напряжения**

Симметризатор токов нагрузки (рис. 1) представляет собой устройство для симметризации токов нагрузки в сети низкого напряжения. Он имеет трехфазную обмотку, соединенную зигзагообразно, известную в течение нескольких десятилетий благодаря широкому применению распределительных трансформаторов среднего и низкого напряжения. Устройство, установленное параллельно в глубине сети (рис. 2) в месте асимметрии тока нагрузки, уменьшает асимметрию тока со стороны питания. Работа устройства заключается в следующем: часть тока, протекающего через нейтральный проводник, поглощается трансформатором и равномерно разделяется на отдельные фазы. Уменьшение асимметрии тока автоматически устраняет асимметрию напряжения вблизи места установки устройства. Основной причиной использования этого типа устройства является необходимость уменьшить асимметрию и флуктуации напряжения (включая мерцание света), вызванные несбалансированным (в основном однофазным) потреблением, особенно в глубине линии.



*Рис. 1 Пример симметризатора токов нагрузки Ensto Phase Balancer*

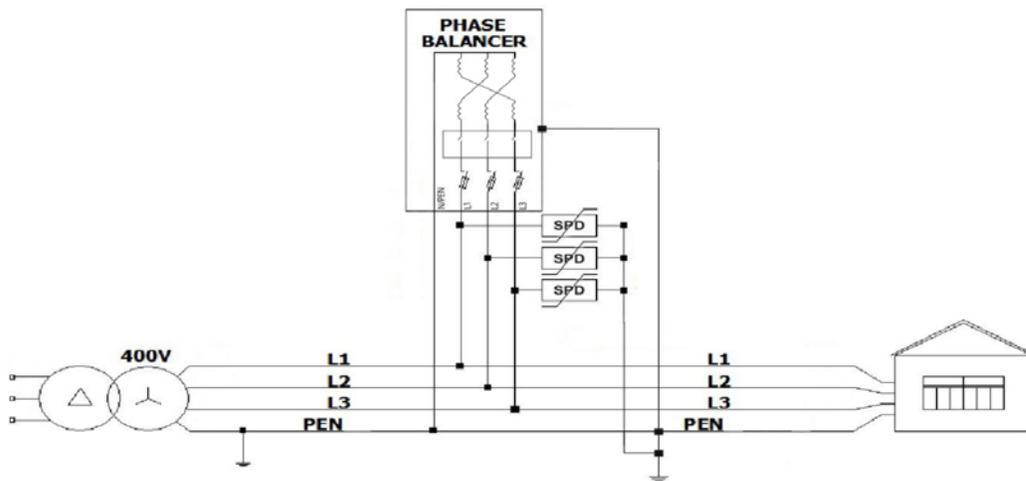


Рис. 2 Схема подключения симметризатора токов нагрузки в сети.

Обязательным условием должно быть то, что в месте установки устройства должна быть выполнена эффективная защита от поражения электрическим током. Симметризатор подключен к сети через предохранитель. Обмотки симметризатора нагрузок (силовые цепи) соединены через контактор, контролируемый системой управления. Устройство, подключенное к сети, работает полностью автономно и позволяет сообщать о текущем рабочем состоянии и измерениях в систему диспетчера сети. Кроме того, он снабжен рядом защит, которые обеспечивают автоматическое отключение обмоток симметризатора от сети в случае особых помех, например, чрезмерного повышения температуры обмоток трансформатора, потери напряжения одной или нескольких фаз или когда напряжения фаз находятся вне диапазона 170-260 В. Когда данный фактор, вызывающий отключение, исчезает, устройство автоматически возвращается к работе в сети.

Симметризатор также защищен от коротких замыканий и перегрузок с помощью плавких вставок. Если перегорела хотя бы 1 вставка, устройство автоматически отключает обмотки симметризатора от сети. В случае замены перегоревших предохранителей на новые, устройство автоматически подключает обмотку симметризатора к сети через 30 с.

### Опыт работы симметризатора нагрузок в сети низкого напряжения

Уже первые установки в сети низкого напряжения показали значительное улучшение симметрии напряжения после установки устройства. Значимость влияния устройства на симметризацию фазного напряжения можно увидеть на диаграммах (рис. 3 и 4) распределения фазных напряжений на действующей сети в России [2].

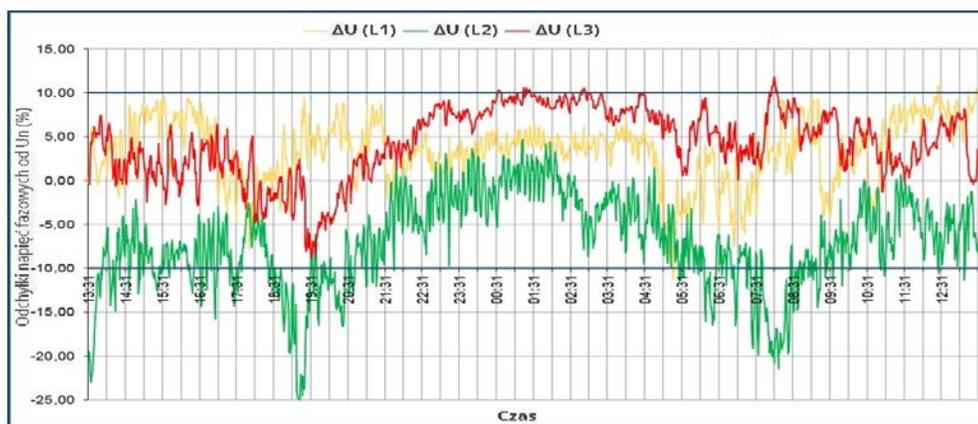


Рис. 3 Суточный график распределения фазных напряжений (отклонения от  $U_n$  в %) перед установкой устройства

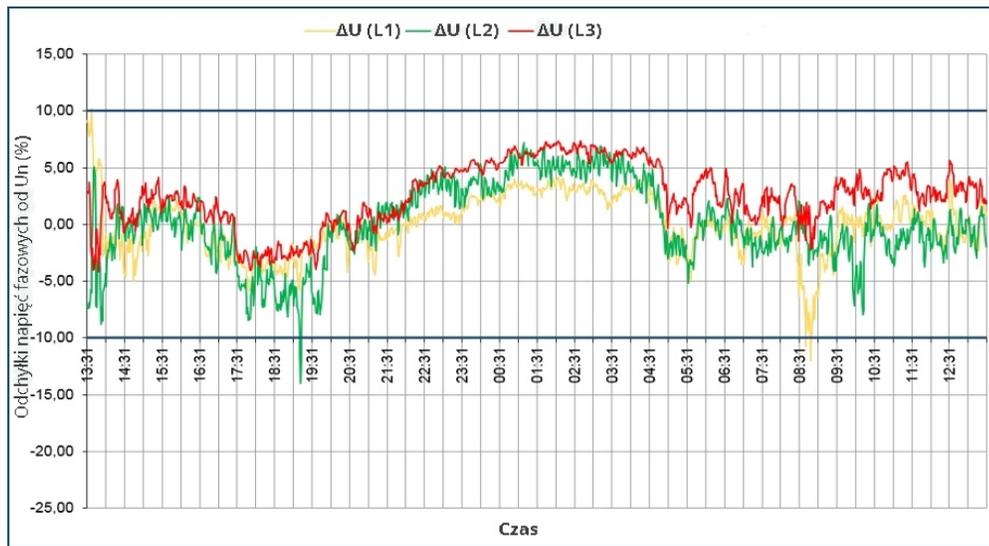


Рис. 4 Суточный график распределения фазных напряжений (отклонения от  $U_n$  в %) после установки устройства

Дополнительные наблюдаемые преимущества, вытекающие из установки симметричного трансформатора в вышеуказанном случае: [2]:

- снижение сопротивления петли сопротивления короткого замыкания - повышение эффективности защиты от поражения электрическим током,
- снижение содержания высших гармоник напряжения (3, 9, 15, 21 и т. Д.)
- снижение уровня мерцания света (в испытательных установках было достигнуто снижение уровня мерцания света более чем в два раза).

## Влияние развития сети заправок для электромобилей на сеть низкого напряжения

Электромобили (EV) медленно, но верно становятся реальной альтернативой традиционным автомобилям внутреннего сгорания. В последние годы страны Европейского союза определили цели для продвижения электромобильности в качестве ключевой меры по снижению выбросов загрязняющих веществ и парниковых газов в городских районах. Финансовая поддержка, наряду с возросшей доступностью зарядной инфраструктуры и преимуществами проезда и парковки в городских центрах, являются решающими факторами ожидаемого увеличения доли электромобилей на транспортном рынке в ближайшие годы.

Наряду с развитием и доступностью электромобилей будет также расширена инфраструктура зарядки, которая в дополнение к станциям быстрой зарядки, установленным в центрах городов, на автозаправочных станциях и вдоль автомагистралей, будет также установлена в домах на окраинах городов. Европейская статистика показывает, что домашние зарядные устройства составляют 80% всех зарядных станций. В таких местах пользования они подключаются к низковольтным сетям на одну или три фазы. Самые популярные зарядные устройства используют однофазное соединение и генерируют 3,7 кВт потребляемой мощности, обеспечивая полную зарядку батарей, как правило, примерно за 4-6 часов (в зависимости от размера батареи). Примером такого устройства является зарядное устройство одного из производителей (рис. 5), позволяющее заряжать с максимальным током 16А.



Рис. 5 Пример однофазного настенного зарядного устройства Ensto eFiller

В настоящее время небольшое количество электромобилей в Польше (6672 - по состоянию на март этого года) пока не представляет серьезных проблем в распределительных сетях. Но, поскольку их доля постоянно увеличивается, системные операторы будут вынуждены улучшать сетевую инфраструктуру и увеличивать возможность динамического регулирования для удовлетворения более высокой мгновенной (пиковой) потребности в мощности, например, с помощью трансформаторов с устройством РПН и автоматизацией ARN. Это особенно важно, потому что большинство зарядных устройств EVC будут питаться от низковольтных сетей. Фактором, ограничивающим низковольтную сеть, является пропускная способность кабелей и трансформаторов среднего / низкого напряжения и, прежде всего, такие параметры, как уровни напряжения или уровень асимметрии.

Дополнительный спрос, возникающий в результате зарядки электромобилей, определяемый как общее потребление энергии во времени (кВтч), не является критическим фактором для сети электропитания. Тем не менее, дополнительная мгновенная потребность в мощности (кВт) может вызвать намного более высокие пиковые нагрузки (вдвое больше, чем потребляемая мощность по сравнению со стандартным профилем клиента). В странах, где количество электромобилей намного выше, чем в Польше, при одновременной зарядке многих автомобилей, подключенных к одной фазе, наблюдались периодические перегрузки. Это связано с тем, что большинство транспортных средств подключаются к зарядной станции, как только водители возвращаются домой, или в определенное время при использовании более низких тарифов на электроэнергию в ночное время. Влияние на профиль сетевой нагрузки будет намного больше, чем в ситуации, когда потребление распределяется более равномерно в течение периода низкой потребности в энергии. На рисунке 6 представлен профиль нагрузки трансформаторной станции среднего / низкого напряжения, который показывает пиковую потребность в дневное и вечернее время в результате стандартного потребления энергии членами домохозяйства. На следующем рисунке показаны примеры профилей, в которых зарядные устройства EVC с различной мощностью были добавлены к стандартному потреблению энергии. Хорошо видно, что пиковая нагрузка зависит от мощности зарядного устройства и может возникнуть сразу после начала зарядки или через несколько часов.

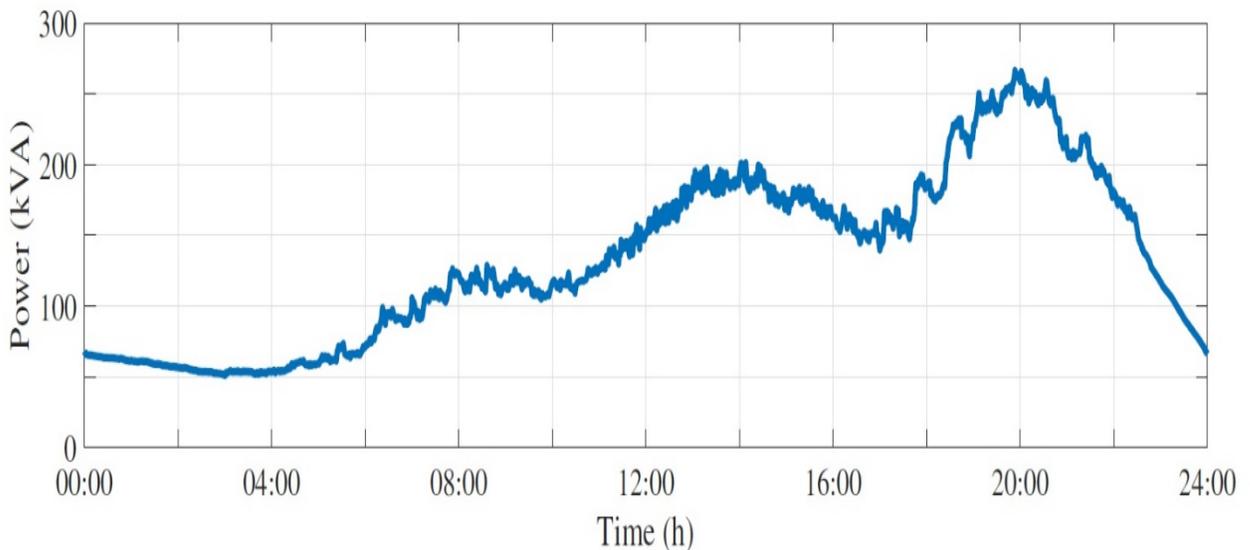


Рис. 6 Стандартный график суточной нагрузки трансформаторной станции без станций зарядок электромобилей EVC [4]

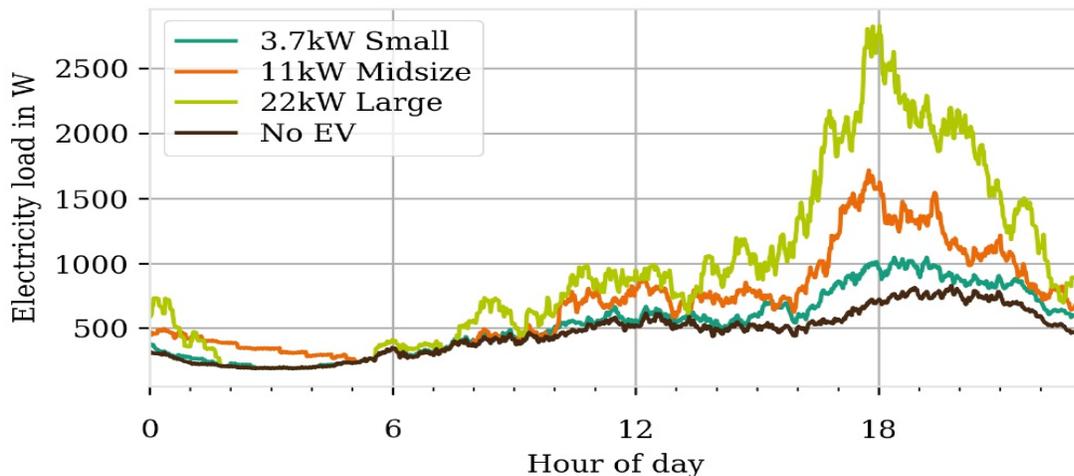


Рис. 7 Примерный график суточной нагрузки трансформаторной станции при включенных зарядках электромобилей EVC [5]

Высокие пиковые нагрузки вызывают (кратковременную) перегрузку сетей электроснабжения, отрицательно влияя на напряжение и пропускную способность сети. Перегрузка сетевых устройств может сократить срок службы сетевых компонентов. Это также может привести к колебаниям напряжения за пределами допустимых уровней и асимметрии, что приведет к повреждению потребительских устройств. Стоит также отметить, что однофазное энергопотребление в несколько кВт, как и в случае зарядки автомобиля, в глубине сети с высоким сопротивлением короткого замыкания может вызвать быстрые и кратковременные падения напряжения на несколько десятков вольт, которые не могут быть компенсированы путем замены отводов в трансформаторе, питающем этот участок сети низкого напряжения. Кроме того, внутренние зарядные устройства переменного тока на большинстве существующих электромобилей обычно имеют однофазную или двухфазную конструкцию, что означает, что электромобили не могут использовать весь потенциал трехфазных зарядных станций переменного тока. В этом случае однофазная конструкция внутренних зарядных устройств переменного тока повышает уровень гармоник и асимметрию тока и напряжения в сети низкого напряжения.

Упомянутый симметризатор нагрузок был разработан для уменьшения негативных явлений, вызванных несбалансированными нагрузками в сети. В качестве примера можно использовать тест на испытательном стенде с реальной, несбалансированной, одно-, двух- и трехфазной нагрузками [2]. Моделирование проводилось для условий установки трансформатора в сети с полным сопротивлением контура короткого замыкания около 1 Ом. Результаты измерений показаны в таблице 1 и на рисунке 8.

1	2	3	4	5
Obciążenie fazy L1 (kW)	Obciążenie fazy L2 (kW)	Obciążenie fazy L3 (kW)	Prąd neutralny (A) bez symetryzatora	Prąd neutralny (A) z symetryzatorem
0	6	0	22,7	3,9
0	10	0	35,4	6,2
0	14	0	46,5	8,5
0	20	0	60,9	11,8
6	6	0	21,6	4,5
6	10	0	29,5	5,6
6	14	0	38,4	7,8
6	20	0	51,3	10,5
10	10	0	32,7	6,5
10	20	0	49	10,4
14	20	0	49,5	11
20	20	0	53,5	12,4
2	20	6	45,9	9,8
14	20	6	31,1	7,3
14	20	10	21,3	5,5

- 1- нагрузка для фазы L1 (кВт)
- 2- нагрузка для фазы L2 (кВт)
- 3- нагрузка для фазы L3 (кВт)
- 4- ток в нейтральном проводе без симметризатора (А)
- 5- ток в нейтральном проводе с установленным симметризатором (А)

Таб. 1. Результаты измерений регулировки уровней токовой нагрузки в нейтральном проводе на измерительном стенде [2].

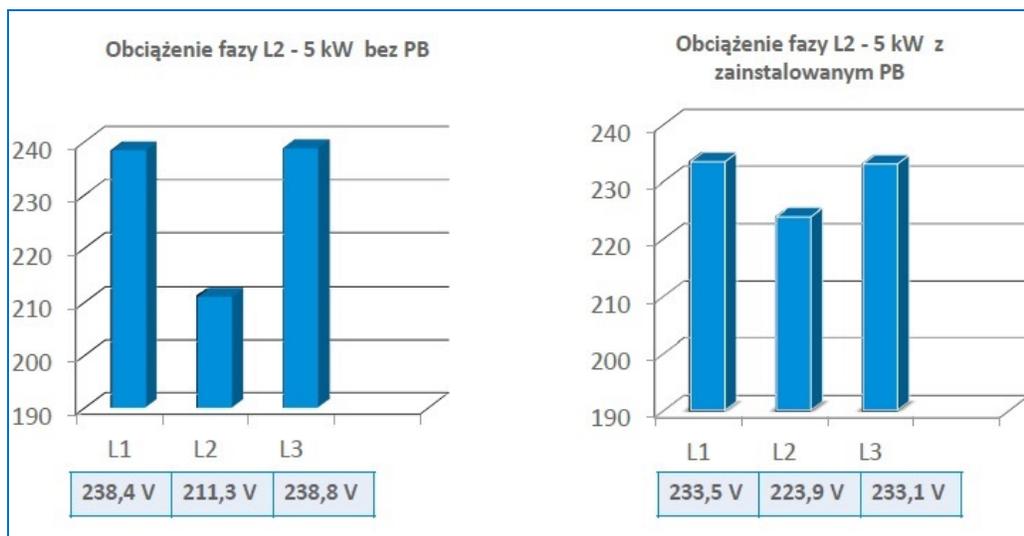


Рис. 8. Результаты измерений уменьшения асимметрии напряжений при несимметрических нагрузках без и с установленным симметризатором [2].

Результаты испытаний показывают эффективное снижение асимметрии напряжения и очень значительное уменьшение тока, протекающего в нейтральном проводнике. Это, очевидно, снижает потери нагрузки в проводниках и трансформаторе. На основании анализа данных измерений на одной из испытательных установок в Польше [1] было установлено, что использование симметризирующего трансформатора позволяет экономить потери энергии от 0,4 МВтч до нескольких МВтч в год.

## Влияние источников солнечных электростанций PV на сеть низкого напряжения

Согласно отчету РТРiREE (Польского общества по передаче и распределению электроэнергии), прошлые годы были рекордными для фотоэлектрических микроустановок СЭС. Например, в 2018 году около 26 000 их были подключены к сети, то есть почти столько же, сколько за все предыдущие годы вместе взятых. По состоянию на 1 марта 2020 года общая установленная фотоэлектрическая мощность в Национальной энергосистеме Польши составила 1596,5 МВт и была больше на 124 МВт по сравнению с январем. Это означает увеличение более чем на 180% в годовом исчислении. Процедурные упрощения подключения к сети и государственные субсидии для физических лиц, которые производят электроэнергию для собственных нужд, оказывают очень значительное влияние на такое быстрое развитие. Хорошим примером является программа My Current, которая, как ожидается, профинансирует строительство почти 200 тысяч фотоэлектрических микроустановок с установленной мощностью от 2 до 10 кВт. Анализируя результаты первых двух конкурсов заявок (по состоянию на 13 февраля этого года), было одобрено более 21 256 заявок общей мощностью 120 583 МВтч / год, что дает в среднем 5,6 кВтч на одну микроустановку. Каждый фотоэлектрический источник, подключенный к сети, должен соответствовать определенным требованиям операторов распределительной сети. Ток, генерируемый при установке и вводимый в сеть,

должен соответствовать условиям качества, установленным оператором в Руководстве по эксплуатации и обслуживанию распределительной сети. В случае фотоэлектрических микроустановок, инвертор, через который установка подключена к сети электропитания, становится критическим элементом системы. Устройство преобразует электричество от фотоэлектрических модулей (напряжение и постоянный ток) в энергию в виде напряжения и переменного тока с параметрами, совместимыми с электричеством в сети низкого напряжения. В случае однофазных инверторов напряжение составляет 230 В, а для трехфазных - 400 В. В дополнение к преобразованию постоянного тока в переменный ток, инвертор также выполняет функции управления (защиты) и выполняет балансировку и учет производства энергии.

Для установок мощностью менее 3,68 кВт используются только однофазные инверторы из-за их исключительной доступности на рынке. Однофазные инверторы в основном используются в домашних установках, где они подключены к наиболее нагруженной фазе. Стоимость такого инвертора ниже, и межфазная балансировка выполняется на счетчике, а не на инверторе. Также выгодно использовать однофазный инвертор из-за его более высокой эффективности для источников мощностью до 3 кВт.

Микроустановки мощностью более 3,68 кВт должны быть оснащены трехфазным инвертором. Согласно данным GUS (Главного Управления Статистики Польши) за 2017 год, среднегодовое потребление электроэнергии одним домохозяйством колебалось от 2200 до 2500 кВтч, то есть среднемесячное потребление электроэнергии домохозяйством в Польше составляет около 200 кВтч. Кроме того, в 2006-2018 годах наблюдается заметное снижение потребления энергии примерно на 5%, что, скорее всего, связано с популяризацией осветительных и энергосберегающих устройств.

Анализируя приведенные выше статистические данные, ясно видно, что однофазные фотоэлектрические микроустановки мощностью до 3,68 кВт имеют очень хорошее соотношение стоимости установки и эффективности использования и становятся основным выбором большинства потребителей.

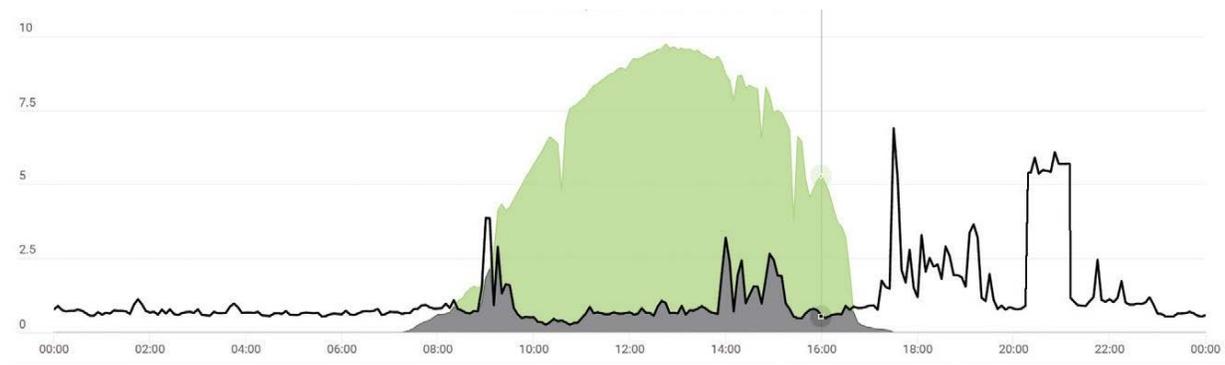


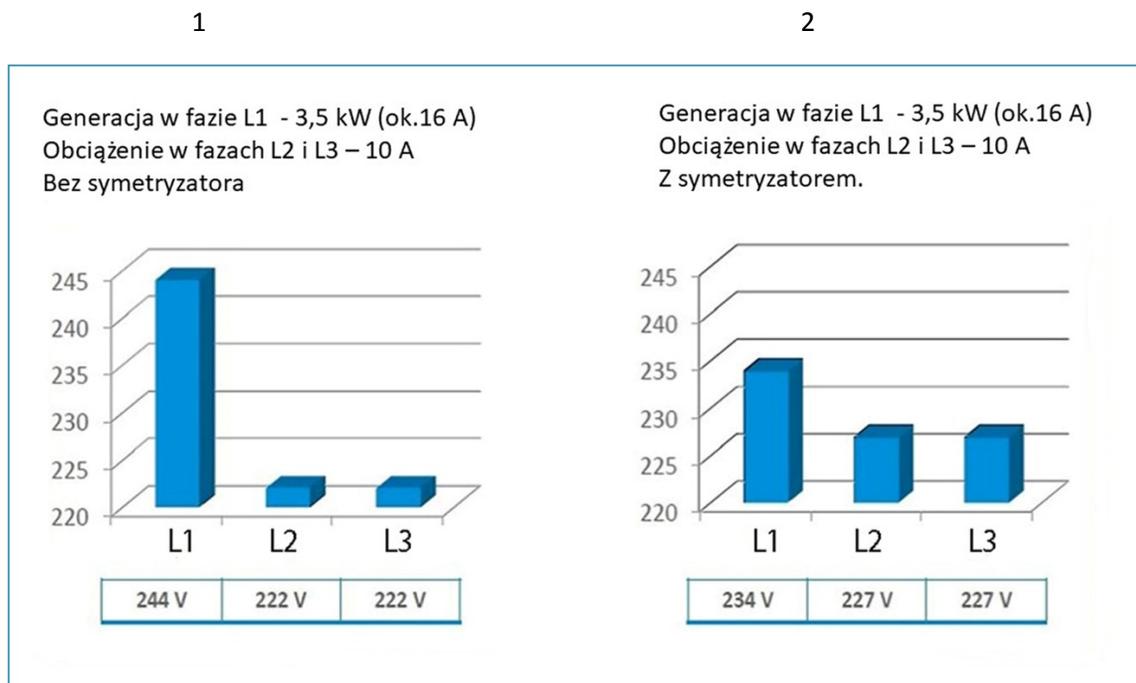
Рис. 8 Примерный график генерирования установками солнечных электростанций PV по отношению к местному потреблению электроэнергии

Наряду с увеличением насыщения низковольтных сетей фотоэлектрическими установками, возникают проблемы асимметрии и превышения допустимых уровней напряжения в часы наибольшей генерации и в то же время самый низкий коэффициент собственного потребления. В основном это связано с подключением фотоэлектрических источников к одной фазе. В случае генерации в фазе питания уровень напряжения значительно возрастает, иногда (в зависимости от условий сети), превышает допустимое напряжение фазы (253 В). Существует также ситуация, в которой инвертор фотоэлектрической системы отключается после срабатывания защиты от перенапряжения, предотвращая продажу электроэнергии от установки в энергосистему. Дополнительной проблемой является большая непредсказуемость (в зависимости от атмосферных условий) количества энергии, генерируемой во времени, и, следовательно, также уровня напряжения в данной фазе, что не позволяет стабилизировать напряжения во всех трех фазах.

Самый простой способ ограничить скачки напряжения - это условно уменьшить активную мощность источника. Однако этот метод оказывает влияние на снижение эффективности фотоэлектрических установок и в реальном выражении снижает прибыль потребителей и может привести к протестам и принуждению для компенсации понесенных убытков. В связи с тем, что операторы распределителей также

зависят от максимального использования эффективности микроисточника, следует искать и внедрять другие методы контроля напряжения. В случае поиска быстрых и «неинвестиционных» методов, то есть не требующих значительных затрат на реконструкцию сети, одним из методов является модернизация трансформаторной станции и установка, например, трансформаторов среднего / низкого напряжения с регулированием отвода в зависимости от нагрузки. Регулируемые уровни напряжения на вторичной стороне трансформатора обычно устанавливаются на +/- (5–10)% больше, чем напряжение, рассчитанное на конечном потребителе для компенсации потерь при передаче в распределительной сети. Контроллер переключателя отводов оснащен механизмами автоматического регулирования напряжения (ARN) для поддержания уровня напряжения в допустимых пределах, требуемых стандартом PN-EN 50160: 2010. Введение нестабильного источника фотоэлектрических установок PV на стороне нагрузки мешает процессу управления, вызывая внезапное увеличение напряжения, обратный поток мощности и последующие изменения подключенных отводов на трансформаторе. Работа трансформаторов с переключателем отводов в сетях с высокой насыщенностью фотоэлектрических источников показывает увеличенное количество переключений, вызванных, например, переменным уровнем облачности, вызывающим нестабильную генерацию многих источников одновременно, и, таким образом, значительное снижение эффективности управления напряжением.

В таких случаях также можно использовать симметризатор нагрузок фазового балансировщика Ensto Phase Balancer для уменьшения асимметрии напряжения. Отличным примером была установка устройства глубоко в сети низкого напряжения, чтобы решить проблемы генерации микроисточника PV, подключенного к одной фазе на конце линии электропередачи (рис. 9). Из-за перенаправления части тока от фазы, подаваемой от PV, к двум другим, напряжение в фазе, питаемой от микроисточника PV, падало, а в других фазах оно увеличивалось. Разница в уровнях напряжения в отдельных фазах от 22 В (около 10%  $U_n$ ) снизилась до 7 В (около 3%  $U_n$ ).



1- Генерация в фазе L1 - 3,5 кВт (около 16А). Нагрузка в фазах L2 и L3 – 10 А без симметризатора

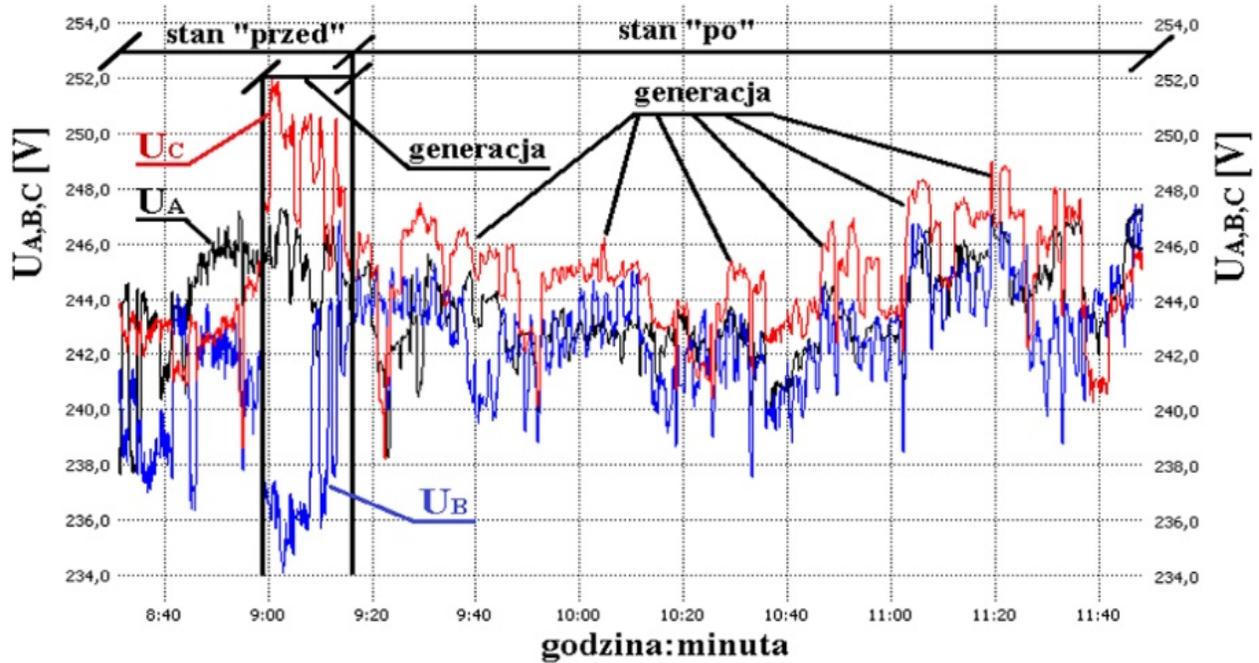
2 - Генерация в фазе L1 - 3,5 кВт (около 16А). Нагрузка в фазах L2 и L3 – 10 А с симметризатором

Рис. 9 Результаты измерений регулировок асимметрии напряжений при однофазном подключении фотоэлектрического источника генерации [2].

Очень интересный и углубленный анализ работы симметрирующего трансформатора представлен в публикации [3]. Работа устройства анализировалась в условиях низковольтной сети с высокой асимметрией, вызванной несбалансированными нагрузками, и сети низкого напряжения, где асимметрия возникла в результате работы однофазных фотоэлектрических установок, подключенных к сети (рис. 10). Было оценено влияние устройства на распределение фазного напряжения и на коэффициенты асимметрии нулевого компонента  $K_{0U}$  и отрицательного компонента  $K_{2U}$  (рис. 11).

1

2



1 – Состояние «перед» и 2 – состояние «после» установки симметризатора

Рис. 10 Пример симметрирования напряжения во время генерирования напряжения перед и после установки симметризатора нагрузки[3]

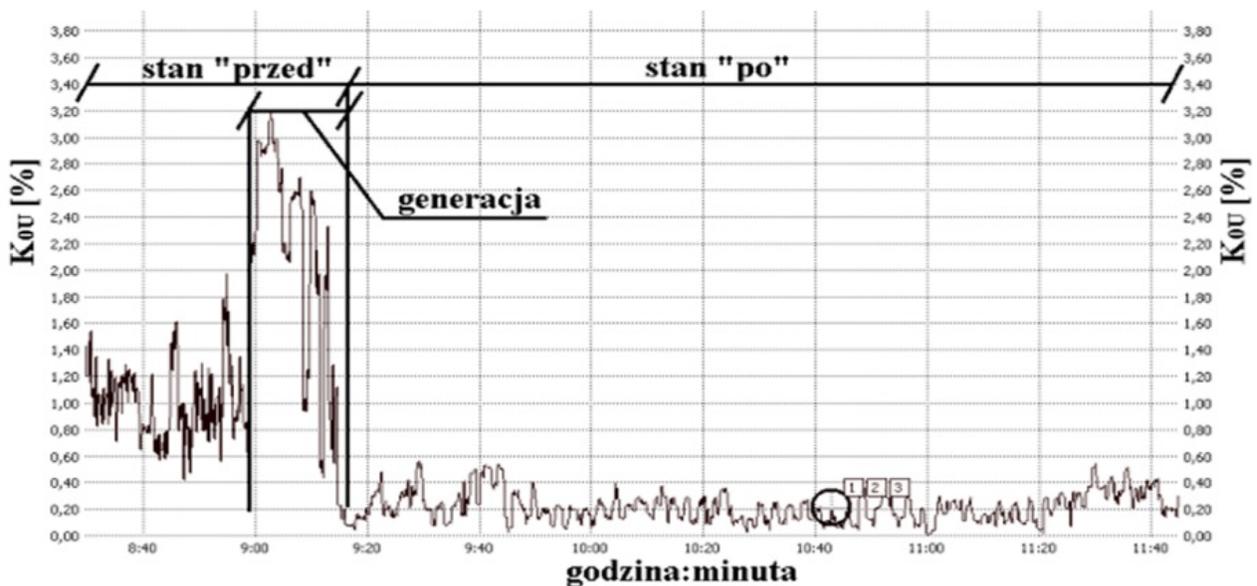


Рис. 11 Коэффициент асимметрии нулевой составляющей  $K_{0U}$  перед и после установки симметризатора нагрузки[3]

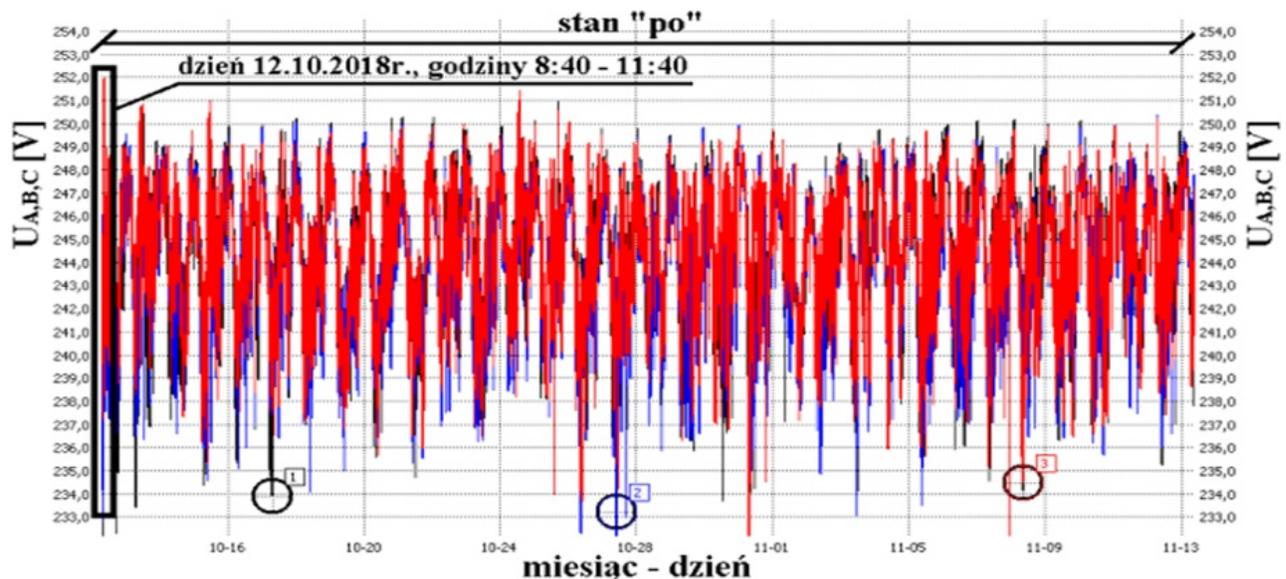


Рис. 12 График фазных напряжений всего измерительного периода (октябрь-ноябрь 2018 года) после установки симметризатора нагрузки [3]

На основании полученных результатов авторы исследования пришли к выводу, что при включении симметризатора асимметрия фазного напряжения снижалась до уровня, соответствующего стандарту, а коэффициент асимметрии нулевой последовательности напряжения  $K_{0U}$  снижался ниже 0,4%.

## Заключение

Результаты измерений подтверждают высокую эффективность симметризатора при уменьшении асимметрии напряжения тока в глубине сети низкого напряжения. Это относится как к случаям, когда асимметрия вызвана несбалансированными нагрузками, такими как зарядные устройства для электромобилей, так и к случаям, когда асимметрия возникает в результате подключения однофазных фотоэлектрических микроустановок к сети, или 3-фазных установок с неравномерным распределением потребления по отдельным фазам.

Установка симметризатора Ensto Phase Balancer в сети низкого напряжения дает дополнительные преимущества, такие как:

- снижение сопротивления короткого замыкания (повышение эффективности защиты от поражения электрическим током)
- снижение содержания высших гармоник напряжения (3, 9, 15, 21 и т. Д.)
- снижение уровня мерцания света.

Как и любое устройство, установленное в сети, симметризатор потребляет мало энергии из сети (собственные потери). Однако, благодаря симметризации фазных токов и уменьшению тока в нейтральном проводнике, устройство может значительно снизить потери нагрузки в фазовом и защитно-нейтральном проводниках, а также уменьшить потери в обмотках распределительного трансформатора среднего / низкого напряжения [1].

## **Литература:**

- [1] Ozorowski M. Stosowanie symetryzatora prądów obciążenia Ensto Phase Balncer jako skutecznego środka do obniżania strat sieciowych i poprawy ochrony przeciwporażeniowej w liniach napowietrznych niskiego napięcia. VIII Konferencja Naukowo-Techniczna Straty energii elektrycznej w sieciach elektroenergetycznych. 21-22 marca 2018 r., Wrocław
- [2] Ozorowski M. , Redukcja asymetrii napięć i prądów w sieciach nn z mikroinstalacjami PV, Szkolenie , warsztaty Wąsowo 2019, Wąsowo.
- [3] Topolski Ł., Woźny K., Hanzelka Z.: Kompensacja asymetrii prądów i napięć powodowanej odbiornikami i odnawialnymi źródłami energii za pomocą transformatora symetryzującego w sieciach niskich napięć. Przegląd elektrotechniczny, R.95 Nr 9/2019
- [4] European Distribution System Operators for Smart Grids, Smart charging: integrating a large widespread of electric cars in electricity distribution grids, March 2018, EDSO Technology Committee
- [5] Nájera J. , Mendonça H., Rosa M. de Castro and Jaime R. Arribas, Strategies Comparison for Voltage Unbalance Mitigation in LV Distribution Networks Using EV Chargers, 2019
- [6] Morsy N., Abdelfatah A., Csaba F, Evaluation of Electric Vehicles Charging Impacts on A Real Low Voltage Grid, 2018
- [7] ENSTO PHASE BALANCER - materiały własne producenta