Connecting Single-Phase Renewable Energy Sources to a 0.4 kV Three-Phase Line While Complying with Standardized Limits on Unbalance Factors

Bosneaga V., Suslov V.
Power Engineering Institute
Chisinau, Republic of Moldova

Abstract.The objective of this study is to develop the methodology and use it to investigate the feasibility of connecting single-phase renewable energy sources to a single 0.4 kV three-phase line while adhering to standardized limitations on unbalance factors. To achieve this goal the model of a three-phase low-voltage overhead cable line, built using MATLAB blocks, is proposed. The model enables calculations of the steady-state operating modes of a three-phase line consisting of five sections of arbitrary length with connection of phase loads and/or single-phase renewable energy sources at the end of each section. The novelty lies in the determination of phase voltage and current magnitudes at any connection points of loads and energy sources along the length of the line. Furthermore, unbalance factors for zero and inverse sequences are determined at the same points. The most important result is that the permissible injection values through a three-phase line, according to power quality requirements, decreases sufficiently with increasing line length due to the significant influence of its zero-sequence resistance. To estimate the permissible injection values from a power quality perspective, depending on the parameters and length of a three-phase line, in the presence of asymmetric loads and injections in different phases, a system calculation must be performed in each individual case. Therefore, it is not possible to develop simple general recommendations for maintaining the specified power quality.
Keywords*:* resistance introduced by a three-phase distribution line, permissible single-phase injection value with asymmetric loads.

DOI:https://doi.org.10.52254/1857-0070.2026.4-72.05
UDC:621.314.2:621.315.1

Determinarea fezabilității conectării surselor monofazate de energie electrică regenerabilă la linie trifazată de cablu aerian0.4 kV cu respectarea restrictiilor impuse de coeficientele de asimetrie

Boșneaga V.A., Suslov V.M.
UniversitateaTehnică a Moldovei, Institutul de Energetică, Chișinău, Republic of Moldova

Rezumat.Obiectivul acestui studio este dezvoltarea metodologiei pentru determinarea fezabilității conectării surselor monofazate de energie electrică regenerabilă la linie trifazată de 0.4 kV, respectând în același timp limitele standardizate ale coeficienților de asimetrie. Pentrurealizareaobiectivuluipropusa fostrezolvateurmatoareleprobleme: elaborat un model uneilinii de cabluaeriantrifazat de joasătensiune,bazatpesoftulMATLAB. Modelulpermitecalculareamodurilorstaționareasimetricepentru o linietrifazatăformată din cinci secțiuni de o anumitălungime cu conectareape faze a sarcinilororisurselor de energie de-a lungulliniei. Noutateaconsta in determinareavalorilortensiunilorșicurenților de fază la punctele de conectare ale sarcinilormonofazatearbitrareori a surselor de energiemonofazatede-a lungulliniei. De asemenea, in aceleasipunctese calculeazăcoeficienții de asimetriede secvență zero șiinversă. Celmai important rezultatestecăvalorile de injecțieadmisibilepentrua indeplinicerințele de calitate a energieielectriceprintr-o linie trifazată scad semnificativ odată cu creșterea lungimii liniei, datorită influenței semnificative a rezistenței sale de secvență zero. Pentru a evaluavalorile de injecțieadmisibilepentrua se conforma cu cerințele de calitateaa energieielectrice, înfuncție de parametriișilungimealinieitrifazate, înprezențasarcinilorasimetriceși a injecțiilor în diferite faze, este necesar să se efectueze un calcul al modului în fiecare caz individual. Prin urmare, nu este posibil să se elaboreze recomandări generale simple pentru menținerea calității specificate.
Cuvinte-cheie:rezistențăintrodusă de linie de distribuțietrifazată, valoareadmisibilăainjecțieimonofazatede current, sarciniasimetrice.

© Bosneaga V, Suslov V., 2026

Подключение возобновляемых однофазных источников энергии к трехфазной линии 0.4 кВ с соблюдением нормируемых ограничений по коэффициентам несимметрии

Бошняга В.А., Суслов В.М.
Технический Университет Молдовы, Институт энергетики, Кишинев, Республика Молдова

***Аннотация*.** Цель работы: разработка методики и исследование с ее помощью возможности подключения однофазных источников возобновляемой энергии к одиночной трехфазной линии 0.4 кВ с соблюдением нормируемых ограничений по коэффициентам несимметрии. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: разработана модель трехфазной кабельной воздушной линии низкого напряжения, Модель позволяет проводить расчеты установившихся режимов работы трехфазной линии, состоящей из 5 участков произвольной длины с пофазным подключением нагрузки и/или однофазных источников возобновляемой энергии в конце каждого участка. Новизна работы заключается в определении модулей фазных напряжений и токов в любых точках подключения нагрузок и источников энергии вдоль всей длины линии. Кроме того, в тех же точках определяются коэффициенты несимметрии по нулевой и обратной последовательности. Наиболее важный результат состоит в том, что допустимые по требованиям качества энергии значения инжекции через трехфазную линию значительно снижаются при увеличении длины линии ввиду заметного влияния ее сопротивления нулевой последовательности. Для оценки величины допустимой с точки зрения качества энергии инжекции в зависимости от параметров и длины трехфазной линии, при наличии несимметричных нагрузок и инжекций в разных фазах, в каждом отдельном случае необходимо проводить расчет режима, поэтому не представляется возможным выработать простые общие рекомендации для соблюдения нормируемого качества. Данная проблема актуальна и значима ввиду все более широкого распространения однофазных источников, которые являются наиболее приемлемым и экономичным вариантом для подавляющего числа небольших потребителей.

***Ключевые слова*:**сопротивление, вносимое трехфазной распределительной линией, величина допустимой однофазной инжекции при несимметричных нагрузках.

ВВЕДЕНИЕ

Работа посвящена созданию модели трехфазной кабельной воздушной линии низкого напряжения для исследования режимов при подключении вдоль линии несимметричных нагрузок и однофазных источников возобновляемой энергии (ВИЭ). Такие источники получают все более массовое распространение в связи с наблюдаемой тенденцией резкого увеличения производства электроэнергии от небольших однофазных ВИЭ. Например, в Германии доля таких устройств по данным [1] составляет около 70%. Следует также учесть, что для относительно небольших потребителей, мощностью до 5 кВт, использование трехфазного подключения с вытекающими отсюда расходами на инверторы, защитные аппараты и др. является значительно более дорогим вариантом. Поэтому актуально исследование возможностей подключения однофазных ВИЭ. Целью работы является исследование зависимостей модулей фазных напряжений и коэффициентов несимметрии по нулевой и обратной последовательности при различных вариантах подключения нагрузок и ВИЭ.

Имеется большое количество работ, в которых рассматривается влияние широкого проникновения однофазных ВИЭ в распределительные сети низкого напряжения на качество электроэнергии и на другие аспекты их функционирования [2-11]. Однако, нигде (за исключением, пожалуй, [10], где основное внимание уделено не столько профилям напряжений вдоль линии, сколько возможностям разных моделей) не анализируется подробно влияние схем подключения однофазных ВИЭ и нагрузок на уровни напряжения и коэффициенты несимметрии напряжений. Обычно распределительные сети 0,4 кВ проектируются так, чтобы обеспечивать допустимые уровни напряжения и коэффициенты несимметрии у потребителя. При этом сеть часто радиальная и поток мощности всегда направлен к потребителю. Однако, при подключении ВИЭ ситуация изменяется, потоки мощности больше не является однонаправленными, так как теперь мощность может также течь обратно от самого дальнего потребителя к подстанции.

Ввиду влияния интеграция ВИЭ на величины напряжений в системе, по мнению авторов [12,13], возникает даже необходимость пересмотра принятых норм для подключения подобных источников. Однако, несмотря на большое количество исследований в данной области (см., например, [14-27]), посвященных различным аспектам влияния ВИЭ на режим работы распределительной сети, нет работ, учитывающих одновременное влияние как нагрузок, так и мест подключения

однофазных ВИЭ, а также параметров трехфазной линии, посредством которой подключаются источники возобновляемой энергии. Поэтому целью данной работы является учет указанных факторов и анализ возникающих режимов для выработки рекомендаций по подключению ВИЭ с учетом упомянутых факторов.

При этом основное внимание уделено выявлению режимов, предельно допустимых по величинам коэффициентов несимметрии по нулевой и обратной последовательности, а также тех, при которых еще соблюдаются нормы по допустимой величине отклонения модулей напряжений фаз у потребителя.

Исследования проведены с использованием разработанной авторами модели в системе МАТЛАБ, базовая схема, положенная в основу проведенных расчетов приведена на рис.1.

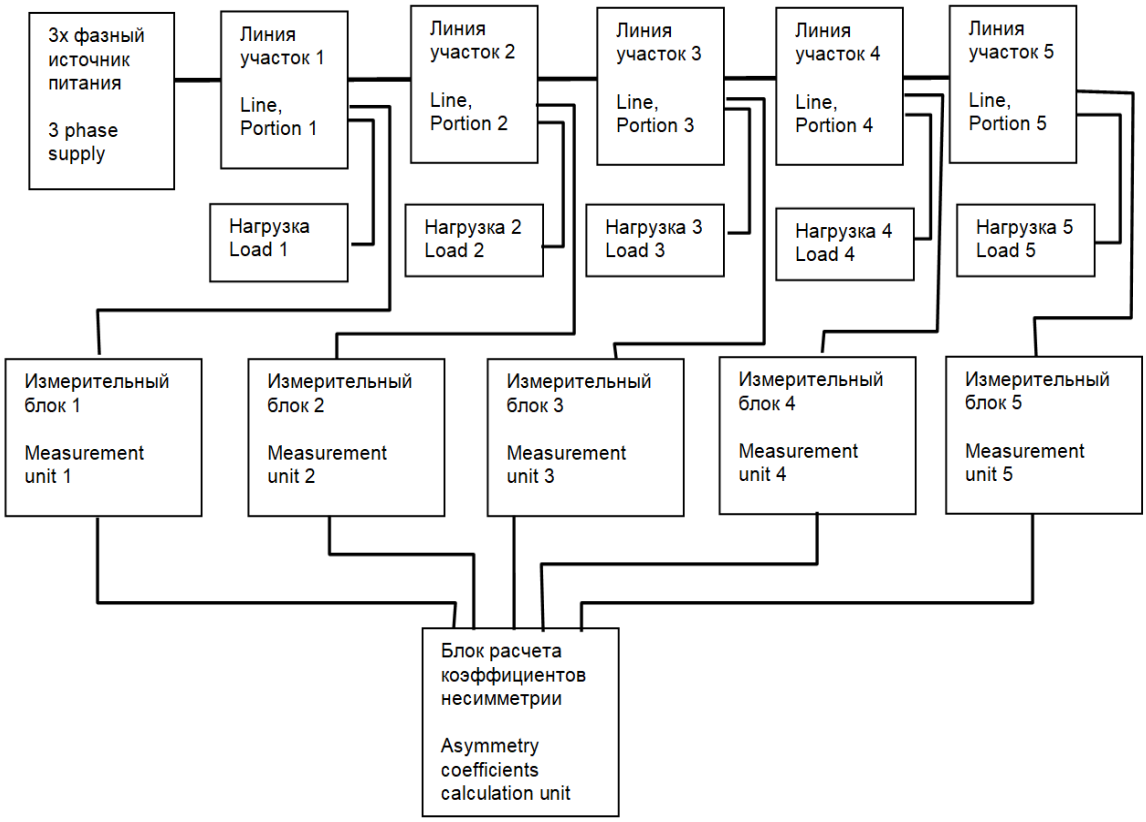


Рис. 1.Блок схема модели для расчетов режимов однофазной инжекции.
Fig. 1. Flowchart of the model for calculating single-phase injection regimes.

Модель состоит из 5 участков линии (Line portion 1 - line portion 5), длина которых может быть задана произвольной, но в данном случаеодинакова для всех участков и составляет 100 метров.

После каждого участка линии включены измерительные блоки 1 – 5 для измерения тока и напряжения в конце каждого участка.

В конце каждого участка также включена трехфазная нагрузка (Load1–Load5), моделируемая положительными активными сопротивлениями, которые могут быть заданы различными для разных фаз.

Эти же блоки используются для задания величины инжекции активной мощности, при этом активное сопротивление должно задаваться со знаком минус.

Это сопротивление и создает отрицательный ток нагрузки, т.е. ток инжекции от возобновляемого источника энергии.

Кроме того, в схеме имеются блоки для расчета коэффициентов несимметрии для нулевой и обратной последовательностей (Asymmetry coefficients...).

В качестве первого этапа ограничимся рассмотрением одной линии, питающейся от шин низкого напряжения (НН) трансформатора, в дальнейшем, при необходимости схема может быть усложнена путем добавления других линий.

Предполагается использование трансформаторов со схемами соединения D/y0, D/z0, сопротивления которых при необходимости можно учесть в дальнейшем, имея ввиду их небольшое сопротивление по сравнению с сопротивлениями линии.

В схеме рис. 1 также предусмотрены блоки для измерения модулей фазных напряжений (Line voltages for phases A,B,C) и токов (Line currents for phases A,B,C).

Рассмотрим далее влияние длины линии до точки подключения однофазного источника ВИЭ на величину возникающей несимметрии и возможность выполнения нормативных требований по допустимым величинам фазных напряжений и коэффициентам несимметрии по нулевой и обратной последовательности у потребителя [28].

Обычно эти нормы составляют ±5-10% для величины напряжения и 2% для коэффициентов несимметрии по нулевой и обратной последовательности, но могут немного отличаться в разных странах.

В качестве исходных данных для расчетов были заданы активное сопротивление линии для прямой и нулевой последовательностей, которые наиболее весомы в воздушных кабельных линиях НН.

Активное сопротивление 4-х проводной кабельной линии сечением 35 мм^{2}для прямой последовательности принято равным 1,12 Ом/км, а индуктивное сопротивление в данном случае на порядки меньше, поэтому им можно пренебречь.

Активное сопротивление для нулевой последовательности принято равным соответственно 6,37 Ом/км, а индуктивным сопротивлением также можно пренебречь.

По предложенной схеме была проведена серия расчетов при однофазной инжекции в разных местах линии с целью выявления величины инжекции, при которой еще соблюдаются нормируемые требования по величине коэффициентов несимметрии в 2%.

При этом, как ранее уже было показано в предыдущих, опубликованных в данном издании, наших работах, оказалось, что наиболее жестким является требование по величине коэффициента несимметрии для нулевой последовательности.

Результаты расчетов показаны на рис. 2, где приведена зависимость такого тока однофазной инжекции от длины линии, который обеспечивает допустимую величину коэффициента несимметрии.

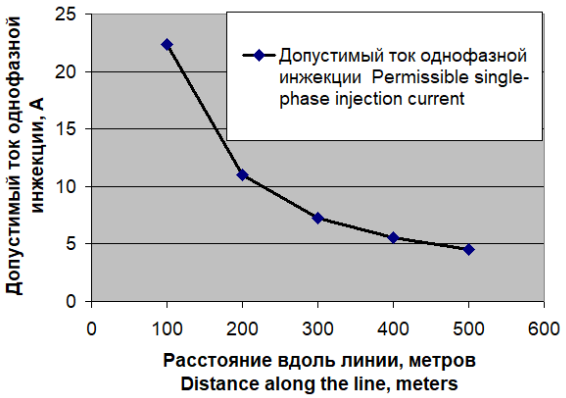


Рис.2.Зависимость тока однофазной инжекции от длины линии, обеспечивающего допустимую величину коэффициента несимметрии.
Fig. 2. Dependence of single-phase injection current on the line length, which provide the permissible asymmetry coefficient.

По горизонтали отложены длины линии, через которые производится однофазная инжекция тока, а по вертикали – максимально допустимый ток инжекции, при котором еще выполняются требования по величине коэффициента несимметрии для нулевой последовательности.

При этом никаких нагрузок на линии нет. Из рис. 2 видно, что величина допустимой инжекции резко уменьшается с увеличением длины линии.

Например, если при длине линии в 100 м допустимый ток инжекции составляет около 23 А (что соответствует мощности источника ВИЭ около 5,3 кВт), то при увеличении длины линии до 500 м допустимый ток резко уменьшается до уровня около 4,5 А (это соответствует мощности источника ВИЭ около 1 кВт).

Рассмотрим далее, как инжекция влияет на величины фазных напряжений в разных точках вдоль длины линии.

На рис.3 приведены графики величин фазных напряжений вдоль линии при однофазной инжекции величиной около 15 А в фазу А в конце линии.

Наибольшие изменения величин напряжений происходят при инжекции в конце линии. Красным пунктиром показано допустимое повышение напряжения в +5%.

При длине линии около 260 м напряжение фазы А, куда происходит инжектирование, повышается сверх допустимого предела.

Напряжения других фаз при этом монотонно уменьшаются к концу линии, оставаясь в допустимых пределах.

Следует отметить, что несмотря на отсутствие токов в фазах B и C, напряжения фаз изменяются вдоль линии.

Этот парадокс связан с особенностями измерения фазных напряжений в модели, которые измеряются относительно нулевого провода, в котором в несимметричном режиме ток есть.

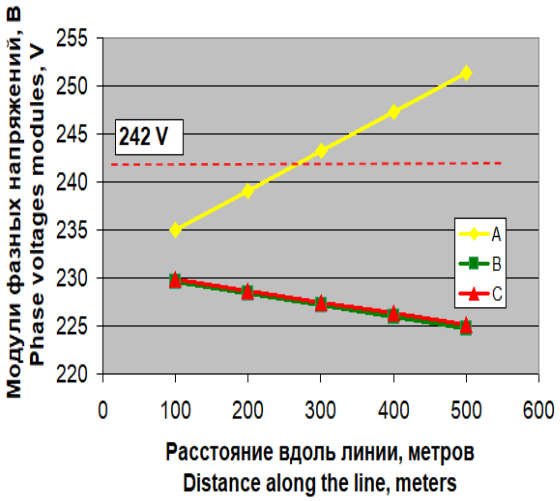


Рис.3.Зависимости фазных напряжений от расстояния вдоль линии при фиксированной однофазной инжекции тока 15 А в конце линии.

Fig. 3. Dependences of phase voltages on the distance along the line with a fixed single-phase current injection of 15 A at the end of the line.

Поэтому его потенциал ненулевой и изменяется вдоль линии относительно нуля схемы.

На следующем рис.4 приведены аналогичные графики изменения напряжений при большей инжекции, равной 25 А.

Видно, что при увеличении инжекции длина линии, при которой повышение напряжения в фазе А все еще остается в допустимых пределах, уменьшается приблизительно до 150 м, а диапазон изменения напряжений фаз увеличивается.

На рис. 5 приведены зависимости коэффициентов несимметрии для нулевой и обратной последовательностей для тех же двух значений инжекции в 15 и 25 А.

Видно, что с точки зрения нормируемой несимметрии в 2% требования к допустимой длине линии для инжектирования еще более ужесточаются. При инжекции в 25 А уже при длине линии в 100 м практически достигается предельно допустимое значение коэффициента несимметрии по нулевой последовательности.

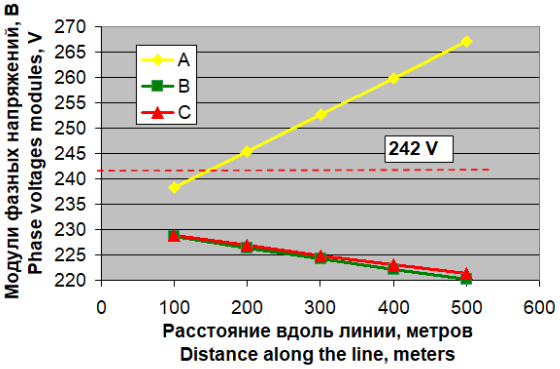


Рис.4. Зависимости фазных напряжений от расстояния вдоль линии при фиксированной однофазной инжекции тока 25 А в конце линии.

Fig. 4. Dependences of phase voltages on the distance along the line with a fixed single-phase current injection of 25 A at the end of the line.

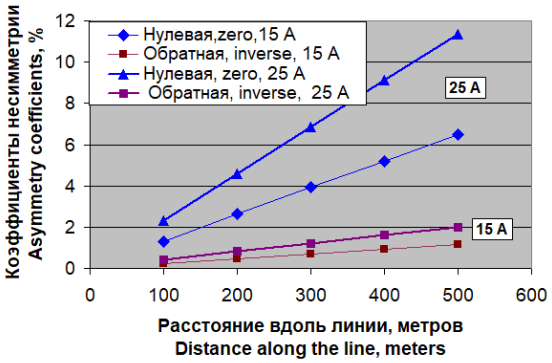


Рис.5. Зависимости коэффициентов несимметрии по нулевой и обратной последовательностей от расстояния вдоль линии при разной однофазной инжекции тока в конце линии.

Fig. 5. Dependences of the asymmetry coefficients for zero and inverse sequences on the distance along the line with different single-phase current injection at the end of the line.

При меньшей инжекции допустимая длина увеличивается до 150 м.

Рассмотрим далее более сложный вариант подключения ВИЭ, когда он включен в средней части линии, а именно в конце первого участка, а в конце линии в той же фазе имеется нагрузка. На рис. 6 приведены графики напряжений фаз для этого случая, когда инжекция имеется на расстоянии 100 м от начала линии. Как видно из рис.6, характер изменения

напряжений фаз в данном случае изменяется кардинально по сравнению с рис.4.

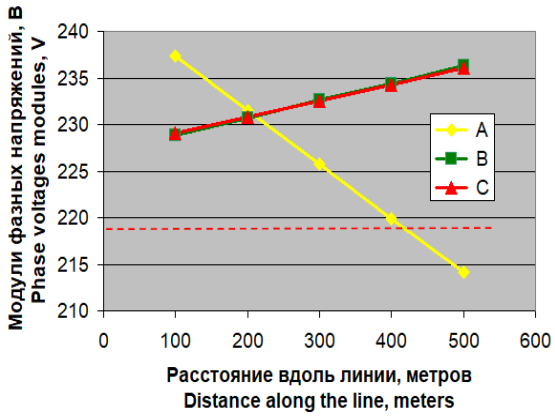


Рис.6. Зависимости фазных напряжений от расстояния при однофазной инжекции в конце первого участка линии и нагрузке в конце в той же фазе.

Fig. 6.Dependences of phase voltages on the distance with single-phase current injection at the end of the first section of the line and load at the end in the same phase.

Наибольшее напряжение достигается, как и ранее, в точке инжекции, однако при наличии нагрузки в конце линии напряжение фазы А, как и следовало ожидать, падает к концу линии, причем в точке около 400 м становится меньше допустимого.

При этом напряжения фаз В и С, в отличие от рис. 4, увеличиваются к концу линии. Таким образом, разное сочетание точек приложения инжекции и нагрузок могут существенно менять характер распределения напряжения вдоль линии.

Отметим, кроме того, что в данном случае, как показали расчеты, ток в первом участке линии находится в противофазе по отношению к напряжению в конце первого участка, т.е., направлен в сеть. Токи остальных участков (как и должно быть) одинаковы и текут в нагрузку в конце линии, их фазы совпадают с фазами напряжений соответствующих участков линии.

На рис.7 показаны зависимости коэффициентов несимметрии по нулевой и обратной последовательности от расстояния вдоль линии для данного случая. Видно, что характер зависимостей коэффициентов несимметрии может быть немонотонным: коэффициент для нулевой последовательности сначала падает, а затем к концу линии увеличивается и может значительно выходить за допустимые пределы в 2%.

Рассмотрим еще один из множества возможных вариантов сочетания инжекции и нагрузки, а именно,

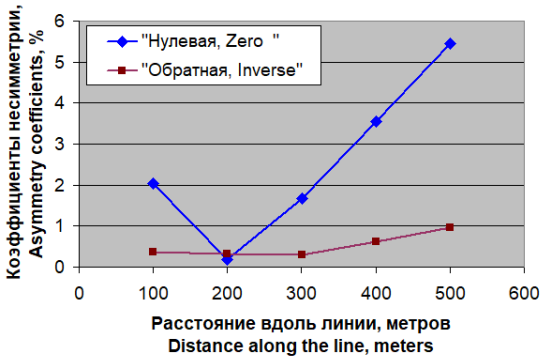


Рис.7. Зависимости коэффициентов несимметрии от расстояния при однофазной инжекции тока в конце первого участка линии и нагрузке в конце в той же фазе.

Fig. 7.Dependences of the asymmetry coefficients on the distance along the line with single-phase injection at the end of the first section of the line and load at the end in the same phase.

инжекция в средней части линии на длине в 300 м, а нагрузка в той же фазе в конце. Графики зависимостей напряжений фаз приведены на рис. 8.

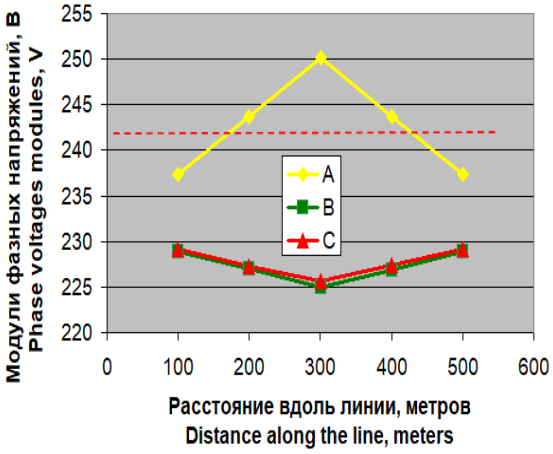


Рис.8. Фазные напряжения вдоль линии при однофазной инжекции в конце 3 участка и нагрузке в той же фазе в конце.

Fig. 8. Phase voltages along the line with single-phase current injection at the end of section 3 and load in the same phase at the end.

Как и ранее, наибольшее напряжение наблюдается в точке инжекции, однако характер изменения фазных напряжений вдоль линии уже не монотонный, имеются точки максимума и минимума напряжений фаз.

На рис.9 показаны зависимости коэффициентов несимметрии по нулевой и обратной

последовательности от расстояния вдоль линии для этого случая.

Видно, что в данном случае, аналогично графикам для напряжений, коэффициенты несимметрии также изменяются немонотонно и имеют максимальное значение в точке инжекции.

Рассмотрим далее еще один из множества возможных вариантов подключения ВИЭ и нагрузки, а именно, инжекция в одну из фаз, а нагрузка в другой.

Расположение инжекции зададим в средней части линии, в конце 3 участка фазы А, а нагрузку в конце линии в фазе В.



Рис.9.Зависимости коэффициентов несимметрии по нулевой и обратной последовательности от расстояния вдоль линии при однофазной инжекции тока в средней части линии и нагрузке в той же фазе в конце.

Fig.9. Dependences of the asymmetry coefficients for zero and inverse sequence on the distance along the line with single-phase current injection in the middle part of the line and the load in the same phase at the end.

Результаты расчета величин напряжений фаз вдоль линии приведены на рис. 10.

Видно, что в этом случае напряжения также могут изменяться немонотонно, причем наименьшее напряжение в фазе А с инжекцией наблюдается в начале линии, а наибольшее в ее конце.

Напряжение фазы В с нагрузкой падает к концу линии. При этом напряжение фазы С изменяется мало. Видно, что напряжения фаз А и В уже при длине приблизительно 150 м выходят за допустимые пределы, отмеченные красными пунктирными линиями.

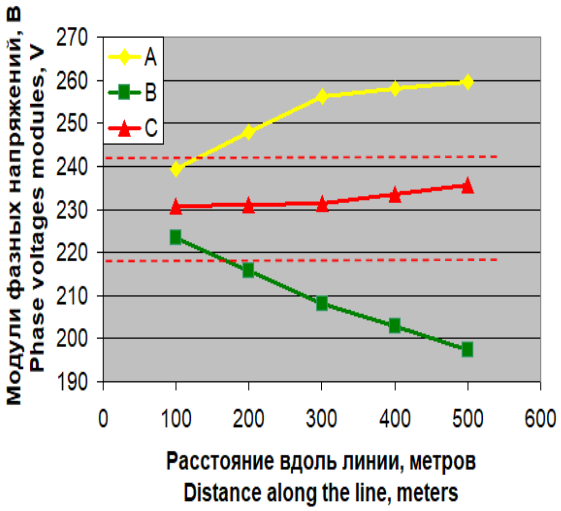


Рис.10. Зависимости фазных напряжений от расстояния вдоль линии при фиксированной однофазной инжекции тока в конце 3-го участка и нагрузке в конце в фазе В.

Fig. 10.Dependences of phase voltages on the distance along the line with a fixed single-phase current injection at the end of the 3rd section and a load at the end in phase B.

На следующем рис.11 представлены зависимости коэффициентов несимметрии для нулевой и обратной последовательностей для данного случая.

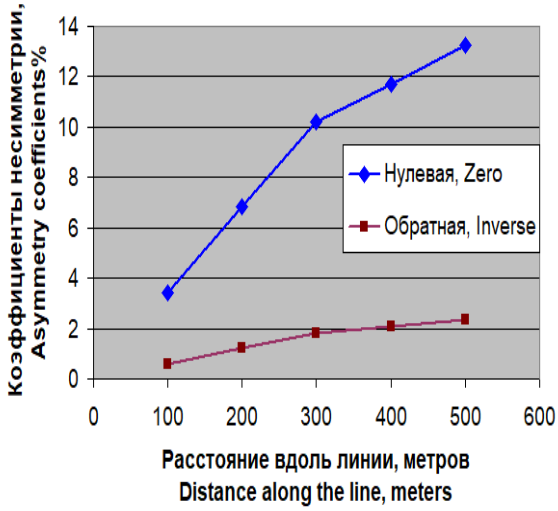


Рис.11. Зависимости коэффициентов несимметрии по нулевой и обратной последовательности от расстояния вдоль линии при однофазной инжекции тока в конце 3 участка и нагрузке в конце в фазе В.

Fig. 11. Dependences of the asymmetry coefficients for zero and inverse sequence on distance along the line with single-phase injection at the end of section 3 and load at the end in phase B.

Видно, что выполнение требований по величине коэффициента несимметрии для нулевой последовательности (синяя линия) возможно только для длины линии порядка 50 м, а при больших длинах этот коэффициент значительно превышает норму в 2%.

Таким образом, при расположении инжекции и нагрузки в разных фазах величины напряжений и коэффициент несимметрии для нулевой последовательности, как видно, подвержены еще большим колебаниям по сравнению с их расположением в одной фазе.

ВЫВОДЫ

1.Полученные результаты показывают, что, как правило, наибольшие отклонения напряжений фаз и наибольшая несимметрия при подключении однофазных ВИЭ наблюдается в точке их подключения.

При этом характер изменения фазных напряжений и коэффициентов несимметрии в разных точках вдоль линии сложным образом зависит от сочетания мест подключения ВИЭ и нагрузок и, в отличие от подключения только нагрузки, может изменяться немонотонно.

2. Ввиду такого сложного характера изменения напряжений и коэффициентов несимметрии для разного расположения инжекций и нагрузок для определения допустимости возникающих режимов при развитии сети в каждом конкретном случае должен быть проведен расчет.

3. При расположении инжекции и нагрузки в разных фазах линии величины напряжений и коэффициент несимметрии для нулевой последовательности в рассмотренных случаях подвержены заметно большим колебаниям по сравнению с их расположением в одной фазе. Для минимизации отклонений рекомендуется подключать как ВИЭ, так и нагрузки, по возможности, к разным фазам сети с учетом их мощностей.

4. В качестве базы для проведения расчетов, при необходимости, может быть использована предложенная модель, доработанная с учетом конкретной конфигурации сети.

БИБЛИОГРАФИЯ (REFERENCES)

[1] Kortenbruck Jan, Premgamone Tawichai, Ortjohann Egon, Holtschulte Daniel, Leksawat Sasiphong, Schmelter Andreas, Varada Shashank, Morton Danny. Asymmetrical grid control with power electronic regulator in distribution level. IET Renewable Power Generation. Special Issue: Selected papers from the 7th International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP 2019). ISSN 1752-1416. https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2020.0054.

[2] KandilS., FaragH.E., HilaireL.St., JanssenE.. Power Quality Monitor System for Quantifying the Effects of Photovoltaic Penetration on the Grid.Proceeding of the IEEE 28thCanadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Halifax, Canada, May 3-6, 2015. pp. 237-241.https://doi.org.10.1109/ccece.2015.7129192.

[3] HabijanDanijel, ČavlovićMarina, JakšićDalibor. The issue of asymmetry in low voltage network with distributed generation. 22nd International Conference on Electricity Distribution, Stockholm, 10-13 June 2013. Paper 0795, CIRED2013 Session S4. https://doi.org/10.1049/cp.2013.0933.

[4] Fidelis EtanyaTiku, TsafackPierre, Khan NgwashiDivine. Grid-connected distributed renewable energy generation systems: Power quality issues, and mitigation techniques – A review. Energy Reports 13 (2025) 3181–3203, https://doi.org.10.1016/j.egyr.2025.02.050.

[5] Marlés-SáenzEduardo, Gómez-LunaEduardo, GuerreroJosep M., VasquezJuan C. Analysis of Impacts in Electric Power Grids Due to the Integration of Distributed Energy Resources. *Energies* 2025, *18*(3), 745; https://doi.org/10.3390/en18030745.

[6] NaumovI. V., KaramovD. N., TretyakovA. N., YakupovaM. A., FedorinovaE. S.. Asymmetric power consumption in rural electric networks. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021, Sci. 677 032088, https://www.doi.10.1088/1755-1315/677/3/032088.

[7] Antonov A., IvanovD., DenchikY., IvanovaE., IvanovM., PalagushkinB., PereladovM., RomanovM.,SalnikovV. Line voltage asymmetry in closed electrical networks with distributed generation as a source of electromagnetic interference. 2021, J. Phys.: Conf. Ser.2131 052004**,** https://doi.org.10.1088/1742-6596/2131/5/052004.

[8] AppenJ., Schmiegel A., Braun M. Impact of PV storage systems on low voltage grids - a study on the influence of pv storage systems on the voltage symmetry of the grid. Germany. Conference Paper, September 2012. https://doi.org.10.4229/27theupvsec2012-5co.8.4.

[9] GirigoudarKshitij, RoaldLine A. On the impact of different voltage unbalance metrics in distribution system optimization. Electric Power Systems Research, Volume 189, December 2020, 106656. Electrical and Computer Engineering Department, University of Wisconsin–Madison, Madison, USA. https://doi.org.10.1016/j.epsr.2020.106656.

[10] Kharrazi Ali,Sreeram Victor; Yateendra Mishra. Assessment of Voltage Unbalance Due to single phase Rooftop Photovoltaic Panels in Residential Low Voltage Distribution Network. 2017, Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC). https://doi.org/10.1109/AUPEC.2017.8282506.

[11] EmmanuelMichael., Ramesh Rayudu. The impact of single-phase grid-connected distributed photovoltaic systems on the distribution network using P-Q and P-V modes. Electrical Power and Energy Systems 91 (2017) 20–33. Victoria University of Wellington, Wellington 6140, New Zealand. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.03.001.

[12] Yongheng Yang, Frede Blaabjerg, Huai Wang, Prasad Enjeti."Suggested Grid-Code Modifications to Ensure Wide-Scale Adoption of Photovoltaic Energy in Distributed Power Generation Systems",IEEE Industry Applications Magazine, Volume: 21, Issue: 5, Sep/Oct 2015, pp. 21-31. https://www.doi.10.1109/mias.2014.2345837 .

[13] Yongheng Yang, Prasad Enjeti, Frede Blaabjerg, Huai Wang. Suggested Grid Code Modifications to Ensure Wide-Scale Adoption of PhotovoltaicEnergy in Distributed Power Generation Systems. 2013 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. Date of Conference: 06-11 October 2013. Print ISSN: 0197-2618. Conference Location: Lake Buena Vista, FL, USA. https://doi.org.10.1109/IAS.2013.6682485.

[14] Pintarič M., ŠtumbergerG.. The impact of different PV system grid integration approaches on voltage profile, grid losses and behavior of PV system owners. 22nd International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'24), Bilbao, (Spain), 26-28th of June 2024. ISSN 2172-038 X, Volume No.22, September 2024. https://doi.org/10.52152/4033.

[15] Wen-Chih Yang, Kuo-Fen Liu Chen-Hong Lin, Zih-Yuan Lin. Analysis of Voltage Unbalance due to Single-Phase Dispersed Generation Systems in Three-Phase Low-Voltage Distribution Feeders. Department of Electrical Engineering Taipei City University of Science and Technology Taiwan. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). ISSN: 2278-0181. Vol. 8. Issue 09, September-2019. www.ijert.org. DOI:10.17577/IJERTV8IS090149.

[16] SilvaG.M.D., TonkoskiR., LeãoR.P.S.. Real-Time Monitoring and Control of Voltage Unbalance in LV Grids with Single-Phase PV Systems. Renewable Energy (2022). https://doi.org.10.1016/j.renene.2021.08.102.

[17] Fernández Gregorio, GalanNoemi, MarquinaDaniel, MartínezDiego, SanchezAlberto, LópezPablo, BludszuweitHans, RuedaJorge. Photovoltaic Generation Impact Analysis in Low Voltage Distribution Grids. Energies 2020, 13, 4347; https://doi.org/10.3390/en13174347.

[18] MásloKarel, KoudelkaJan, BátoraBranislav, VyčítalVáclav. Asymmetrical, Three-phase Power System Model: Design and Application. ActaPolytechnicaHungarica Vol. 20, No. 11, 2023. https://acta.uni-obuda.hu/Maslo_Koudelka_Batora_Vycital_140.pdf.

[19] PapachristouAnastasios C., AwadAhmed S. A., TurcotteDave, WongSteven, PrieurAlexandre. Impact of DG on Voltage Unbalance in Canadian Benchmark Rural Distribution Networks. CanmetENERGY, Natural Resources Canada, Varennes, Québec, Canada. 2018 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC). 978-1-5386-5419-4/18/$31.00 ©2018 IEEE. https://doi.org.10.1109/EPEC.2018.8598420.

[20] Chaofan Hou, Caixia Zhang, Peng Wang, Siyu-Liu.Renewable energy based low-voltage distribution network for dynamic voltage regulation. Results in Engineering 21 (2024) 101701. www.sciencedirect.com/journal/results-in-engineering. State Grid Beijing Electric Power Company Information and Communication Branch, Beijing 100076, China. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101701.

[21] Silva Marco, Castro Rui, Ferreira de Jesus J.M., "Voltage Unbalance in Low Voltage Networks with Single-phase and Three-phase Micro-Generation and Loads", Journal of Electrical Systems, Vol.11, No.2, pp. 210-222, June 2015. https://www.academia.edu/87199602/Voltage_Unbalance_in_Low_Voltage_Networks_with_Single_phase_and_Three_phase_Micro_Generation_and_Loads.

[22] Kharrazi A., Sreeram V., Mishra A. Assessment techniques of the impact of grid-tied rooftop photovoltaic generation on the power quality of low voltage distribution network -A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 120 (2020) 109643. journal homepage: http://www.elsevier.com/locate/rser.

[24] Santos Fábio, Castro Rui. Connecting Renewables to the Grid: Can Iberian Substations Absorb the 2030 Clean Energy Targets, Energy and Climate Change. 2026, https://doi.org/10.1016/j.egycc.2026.100271.

[25] Ramos H. M., Fuentes J.E.Q., Bekçi E., Coronado-Hernandez O. E., Kuriqi Alban, Castro Rui, Modesto Perez-Sanchez. Integrated Renewable Energy for Urban and Remote Communities: Hybrid Solutions with Hydro Pumped Storage and Green Hydrogen Opportunities, Advanced

Sustainable Systems, 2026, https://doi.org/10.1002/adsu.70512.
[26] Khan Bilal, HussainSadam, Ullah Hayat, Chuyan Lai, Mohamed Ahmed A., Eicker Ursula. Low voltage distribution grids optimization with increasing distributed energy generation: A review, Energy Reports, Volume 15,2026,108913,ISSN 2352-4847, https://doi.org/10.1016/j.egyr.2025.12.050.
[27] Mocci, S.; Ruggeri, S.; Pilo, F. Low-Voltage Renewable Energy Communities' Impact on the Distribution Networks. *Energies***2025**, *18*, 126. https://doi.org/10.3390/en18010126.
[28] Moldova Standard SM EN 50160:2014. Caracteristici ale tensiuniiînreteleleelectricepublice de distributie. INS: Chisinău, 2014, pp.11-12. (In Romanian).

Сведения об авторах.



Бошняга Валерий Анатольевич, ведущий научный сотрудник. Основные научные интересы расчета несимметричных режимов работы электрических сетей.E-mail: valeriu.bosneaga@gmail.com ORCID:0000-0002-1272-0086



Суслов Виктор Миронович, научный сотрудник, научные интересы связаны с режимами энергетических систем, E-mail:svic-torm46@gmail.com ORCID:0000-0003-3036-1109