

ГАРМОНИКИ

Размеры нейтрального провода в электросетях с сильными токами гармонических составляющих

Профф. Жан Десме, университет провинции Западная Фландрия, Бельгия; профф. Анджело Баггини, университет Бергамо, Италия. Июнь 2003 г.

Размеры нейтрального провода в электросетях с сильными токами гармонических составляющих

Введение

В данном разделе рассматриваются размеры нейтрального провода в электросетях, в которых присутствуют явления, снижающие качество электроэнергии, например гармоники $3xN$ порядка, т.е. токи, вызванные гармониками, порядок которых кратен трем. Это имеет особую важность в системах низкого напряжения, в которых паразитные гармоники, вызванные однофазными нагрузками, являются постоянно растущей проблемой. Амплитуды токов гармоник третьего порядка арифметически суммируются в нейтральном проводе, в отличие от симметричных токов основных гармоник и гармоник других порядков, векторная сумма которых в нейтральном проводе равна нулю. В результате в нейтральном проводе возникают токи, сила которых часто значительно превышает (обычно до 170%) силу тока в проводах фаз.

Размеры проводов определяются частью 5-52 стандарта МЭК 60364: Подбор и установка электрического оборудования – системы электропроводки. Этот стандарт включает правила и рекомендации по размерам проводников в зависимости от силы потребляемой нагрузкой тока, типа изоляции кабеля, а также способа и условий установки. Некоторые нормативы вместе с изложенными в приложении «D» рекомендациями определяют размеры нейтрального провода в условиях наличия гармоник. Национальные стандарты принимаются вскоре после стандарта МЭК 60364, но между выходом международного стандарта и национальными стандартами существует значительная разница во времени, поэтому большинство национальных стандартов до сих пор не описывают подробно размеры нейтральных проводов. Целью данной прикладной статьи является разъяснение для широкой аудитории вопросов, связанных с упомянутой проблемой, и современных рекомендаций МЭК.

Теоретическая база

В трехфазных сетях с соединением по схеме «звезда» ток в нейтральном проводе является векторной суммой токов в трех фазовых линиях. В случае симметричной синусоидальной трехфазной системы токов эта сумма равна нулю в любой момент времени и ток в нейтральном проводе также равен нулю (рис. 1).

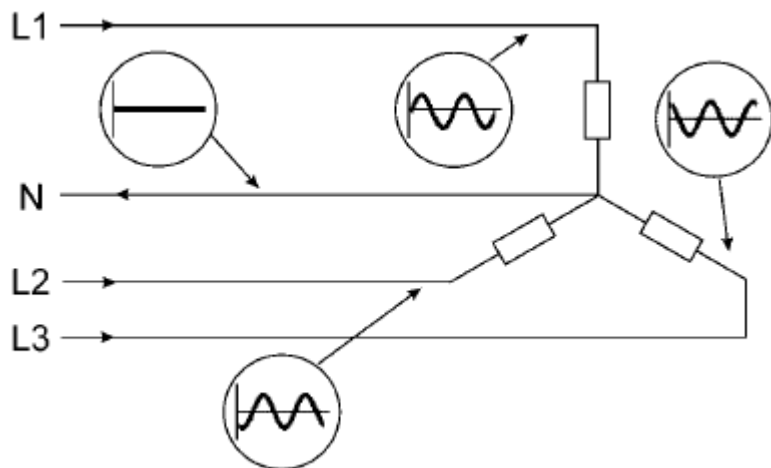


Рис. 1. В случае симметричной трехфазной нагрузки ток в нейтральном проводе равен нулю.

В силовой трехфазной сети, питающей линейные однофазные нагрузки, ток в нейтральном проводе редко равен нулю, так как нагрузка на каждой фазе разная. Обычно эта разница невелика и во многих случаях ток в нулевом проводе намного меньше тока в фазовых проводах (рис. 2).

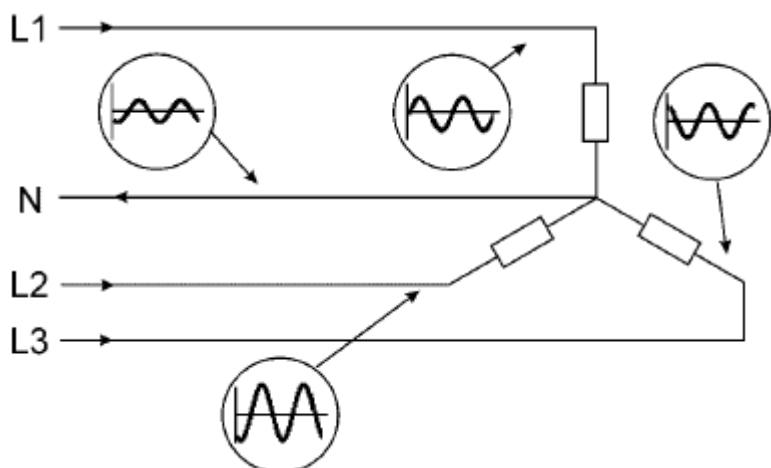


Рис. 2. В случае несимметричной трехфазной нагрузки ток в нейтральном проводе не равен нулю, но его величина меньше, чем у тока в фазовом проводе.

В случае питания нелинейных нагрузок, даже когда нагрузки в каждой фазе хорошо сбалансированы между собой, существует вероятность протекания в нейтральном проводе тока значительной силы. Если токи имеют несинусоидальный характер, то сумма токов в трех фазах, даже при одинаковых среднеквадратических значениях, может отличаться от нуля. Например, токи с одинаковыми среднеквадратическими значениями, представляющие собой импульсы прямоугольной формы, породят в нейтральном проводе достаточно большой ток (рис. 3).

Действительно, компоненты гармоники третьего порядка (и всех других гармоник, кратных трем, - шестой, девятой и т.п.) фазовых токов синфазны друг другу (т.е., они являются униполярными компонентами) поэтому они суммируются арифметически, а не взаимно компенсируются в результате векторного сложения (рис. 4).

Размеры нейтрального провода в электросетях с сильными токами гармонических составляющих

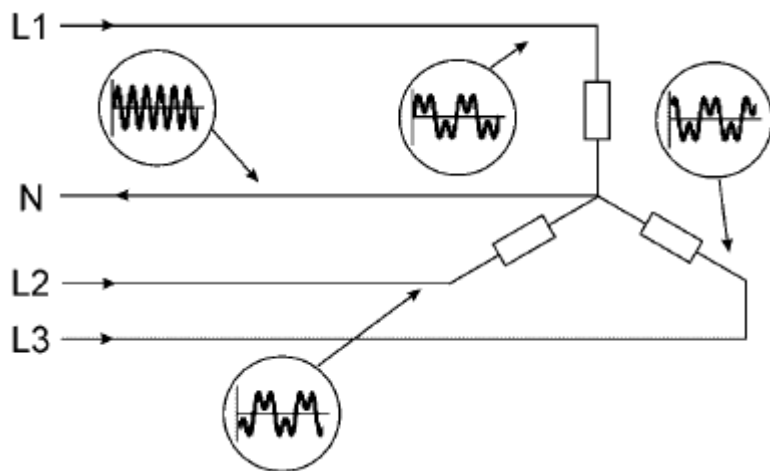


Рис. 3. В случае нелинейной трехфазной нагрузки ток в нейтральном проводе из-за наличия униполярных гармоник не равен нулю и может быть больше чем ток в фазах.

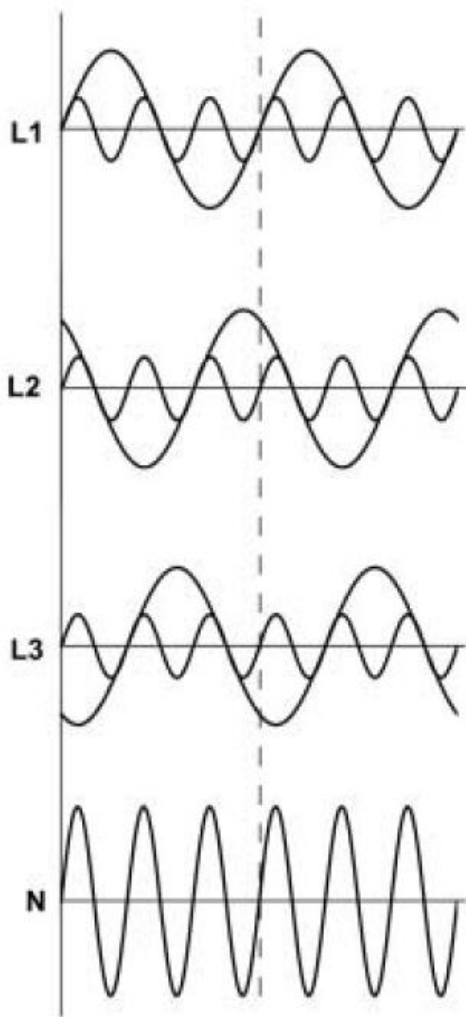


Рис. 4. Токи, вызванные гармониками с номерами кратными трем, в нейтральном проводе.

Амплитуда вызванного гармониками третьего порядка тока на частоте сети в нейтральном проводе может превышать амплитуду тока в фазовых проводах.

Требования стандартов

Стандарт МЭК 60364-5-52:2001 «Электрические сети в зданиях – часть 5-52: подбор и установка электрического оборудования – системы электропроводки» касается безопасности установки сетей с точки зрения технологии монтажа и размеров проводов. Способ монтажа часто оказывает влияние на температурный режим работы кабеля электропроводки и, тем самым, определяет токопроводящую способность жилы провода или сети. Там, где в один кабельный канал, в одну трубу или в одну полость укладываются кабели нескольких сетей, токонесущая способность каждого отдельного кабеля уменьшается из-за эффекта взаимного нагрева. Другими словами, фактическая токопроводящая способность кабеля определяется количеством тепла, создаваемого протекающим током, и количеством тепла, отводимого от кабеля в результате конвекции. Оба эти фактора вместе определяют рабочую температуру кабеля, которая, конечно, не должна превышать температуру, соответствующую материалу изоляции, равную 70°C для термопластичной изоляции (например, ПВХ) или 90°C для терморезистивной изоляции (например, из сшитого полиэтилена - XLPE). Указанные в стандарте паспортные данные и поправочные коэффициенты основаны на практических испытаниях и теоретических расчетах для типовых условий и должны корректироваться в соответствии с известными условиями монтажа. Так как наличие в нейтральном проводе токов, вызванных гармониками 3хN порядка, приводит к сильному тепловыделению, то при выборе размера кабеля необходимо это учитывать.

Ссылки на размеры проводов для сетей с токами несинусоидальной формы можно найти в стандарте МЭК 60364-5-524. В пункте 524.2 указано, что нейтральный провод должен иметь, по крайней мере, такое же сечение, как и провода фаз:

- в двухпроводных однофазных сетях для сечений всех жил;
- в многофазных сетях и трехпроводных однофазных 1) сетях, когда сечение фазовых проводов не превышает 16 мм² в случае использования меди или 25 мм² в случае использования алюминия.

1) т.е. в однофазной сети электропитания с выводом от средней точки, где средняя точка является нейтралью.

Размеры нейтрального провода в электросетях с сильными токами гармонических составляющих

В пункте 524.3 указывается, что в других многофазных сетях нейтральный провод может иметь уменьшенное сечение, если удовлетворяются следующие условия:

- максимальный расчетный ток, включая токи, вызванные гармониками (если имеются), в нейтральном проводе во время нормальной работы не превышает токопроводящую способность зоны уменьшенного сечения нейтрального провода;
- нейтральный провод защищен от сверхтоков;
- нейтральный провод имеет сечение не менее 16 мм^2 , если он изготовлен из меди или 25 мм^2 , если он изготовлен из алюминия.

Перечисленные пункты стандарта являются нормативами. Другими словами они определяют требования, которые должны выполняться для обеспечения соответствия стандарту. Однако для выполнения этих требований необходимы знания типа и количества нагрузок, которые будут использоваться в сети после ее пуска в работу. К сожалению, эта информация имеется в редких случаях. Стандарт также включает информационное приложение, содержащее сведения в помощь разработчикам в виде руководств и рекомендаций, а не в виде обязательных нормативов. Эти сведения могут использоваться как методология определения правильных размеров кабелей.

Данный раздел содержит упомянутые рекомендации вместе с рабочими примерами и некоторыми наблюдениями, касающимися отклонений от нормативных значений в коллективных кабелепроводах и эффектов, связанных с падениями напряжения.

Рекомендации, изложенные в стандарте

На работу электрического устройства или провода сильное влияние оказывают нарушения в системе, источнике электропитания или нагрузке. Из всех электромагнитных помех, воздействующих на кабели электропитания, наиболее важными является наличие гармоник тока. Результатом этого явления могут стать перегрузки в обоих фазовых и нейтральном проводах. Внимание в данной статье сосредоточено на размерах нейтрального провода.

Стоит заметить, что представленные в стандартах таблицы номинальных значений токов предполагают большое количество допущений, и определение, какие из допущений необходимо отклонить и внести соответствующие исправления, является обязанностью проектировщика. Наиболее важным допущением является то, что в пяти- или четырехжильном кабеле только три жилы используются для передачи тока. Другими словами, предполагается, что нагрузка должна быть симметричной и линейной. В случаях, когда нагрузка несимметричная, но линейная, вызванный несимметричностью ток протекает по нейтральному проводу. Однако это компенсируется тем, что, по крайней мере, один фазовый провод имеет уменьшенную нагрузку. Если допустить, что в фазовых проводах нет перегрузки, то суммарное выделение тепла в результате протекания тока по кабелю не превысит допустимого значения. Если нагрузка будет нелинейной, то ток, протекающий по нейтральному проводу, внесет свою долю в общие тепловые потери в кабеле дополнительно к полному тепловому действию тока в трех фазовых проводах.

В условиях искажений формы тока, описанных в параграфе 1.2, тепловое рассеивание в проводнике в результате теплового действия тока больше, чем в условиях идеальной линейной нагрузки, поэтому пропускная способность линии уменьшается. Дополнительно к этому, нейтральные провода, сечение которых в установленных ранее электросетях зданий

часто меньше сечения фазовых проводов (см. параграф 1.3), могут испытывать перегрузку даже в тех случаях, когда ток в нейтральном проводе не превышает номинальное значение тока в фазовом проводе.

Невозможно определить в абсолютных величинах ток в нейтральном проводе, пока не будет определена теоретически или практически форма тока в нагрузке. Однако, если применить аппроксимацию, отношение тока в нейтральном проводе к току в фазовом проводе может составлять 1,61 в случае таких нагрузок, как компьютеры, но в худших условиях это соотношение может составлять 1,73, если нагрузкой являются управляемые выпрямители при больших углах управления, т.е., при низких напряжениях постоянного тока ($\alpha \geq 60^\circ$).

Самый простой способ решить проблему – это применить соответствующие поправочные коэффициенты при определении токонесущей способности провода. В приложении «D» стандарта МЭК 60364-5-52 также дается способ определения коэффициента поправки к паспортному значению силы тока. Для упрощения в предложенном подходе сделаны следующие допущения:

- система является трехфазной и симметричной;
- единственная значимая гармоника, не компенсируемая в нейтральном проводе, является третьей гармоникой (т.е., другие гармоники порядка $3xN$ имеют относительно низкие амплитуды, а прочие гармоники приблизительно симметричны и их векторная сумма близка к нулю);
- кабель имеет 4 или 5 жил с нейтральной жилой из того же материала и того же сечения, что и фазовые жилы.

Размеры нейтрального провода в электросетях с сильными токами гармонических составляющих

Ток 3-й гармоники в фазовом проводе (%)	Значение, выбранное на основе силы тока в фазовом проводе	Значение, выбранное на основе силы тока в нейтральном проводе
0-15	1,00	-
15-33	0,86	-
33-45	-	0,86
> 45	-	1,00

Таблица 1. Коэффициенты уменьшения для кабелей с токами, вызванными гармониками порядка 3хN.

При самом строгом подходе расчет влияния токов, вызванных гармониками, также должен учитываться поверхностный эффект, который снижает пропускную способность в зависимости от размера проводника, но при первом приближении, его можно не учитывать.

В таблице 1 содержатся рекомендованные коэффициенты уменьшения.

Для расчета пропускной способности кабеля с четырьмя или пятью жилами, в котором в нейтральной жиле присутствует вызванный гармониками ток, нужно умножить стандартную токонесущую способность кабеля на поправочный коэффициент.

Для тока в фазовых проводах, в котором доля вызванного гармониками 3хN порядка тока составляет не более 15%, стандарты не предусматривают какого-либо увеличения сечения нейтрального провода. В этих условиях ожидается, что сила тока в нейтральном проводе не превысит 45% от силы тока в фазовом проводе, а увеличение тепловыделения составит приблизительно 6% от величины, соответствующей току номинального значения. Эти избыточные значения обычно являются допустимыми за исключением систем с плохой вентиляцией или когда рядом находятся другие источники тепла. Желательно предусмотреть дополнительный резерв мощности, например, при прокладке кабеля в тесном пространстве.

Если в фазовых проводах доля токов 3хN гармоник превышает 33%, то паспортные данные кабеля должны определяться на основе тока в нейтральном проводе. Если ток 3хN гармоник в фазовых проводах составляет от 33% до 45%, то размер кабеля определяется током в нейтральном проводе, но для вычисления номинального тока используется поправочный коэффициент 0,86. Если ток 3хN гармоник составляет 45%, то номинал кабеля определяется по току в нейтральном проводе, т.е. 135% тока в фазовом кабеле, рассчитанного с поправочным коэффициентом 0,86.

Если составляющая тока 3хN гармоник еще больше, например при типичном наихудшем варианте на них приходится 57%, размер кабеля полностью определяется током в нейтральном проводе. В этом случае не требуется применять поправочный коэффициент, так как размер фазовых проводов будет превышать необходимое значение.

Хотя данные для выбора поправочного коэффициента рассчитываются только на основе силы тока третьей гармоники, но если ток, создаваемый 3хN гармониками более высоких порядков, превышает 10%, то допустимое значение тока в кабеле будет еще меньше. Описанная ситуация особенно критична, когда несколькими сетями используется один общий нейтральный провод (если это допускается местными нормативами).

В таблицах 2 – 5 показано, как меняется допустимое значение тока при наличии и при отсутствии токов, вызванных гармониками 3-го порядка. Допустимые значения тока рассчитываются в соответствии со стандартом МЭК 60364-5-523. Указанные в таблице значения действительны для 4-жильного кабеля 0,6/1 кВ с термореактивной (90°C) изоляцией.

При использовании одножильных кабелей, выбор сечения фазового и нейтрального проводов становится независимым. Но с другой стороны аналитически смоделировать тепловое взаимодействие более сложно из-за вариативности относительного расположения проводов.

Наиболее прямым способом решения задачи является независимое определение размера нейтрального провода с обязательным учетом того, что тепловые характеристики и реактивное сопротивление сети зависит от относительного расположения проводов. Дополнительными факторами, которые необходимо учитывать, являются следующие:

- когда кабель прокладывается вместе с другими кабелями, повышенный ток в кабеле (например, вызванный гармониками ток в нейтральном проводе), создает больше тепла, которое воздействует на другие кабели; это необходимо учитывать при использовании сложных коэффициентов группировки;
- падение напряжения в нейтральном проводе, вызванное всеми 3хN гармониками, вызывает нелинейные искажения напряжения во всех фазах источника питания; это может потребовать еще большего увеличения сечения нейтрального провода в кабелях большой длины.

Размеры нейтрального провода в электросетях с сильными токами гармонических составляющих

Площадь сечения (мм ²)	Воздух (30°C)		Земля (20°C)			
	Открытая проводка	Кабелепровод	Кабелепровод $\rho = 1$	Кабелепровод $\rho = 1,5$	Незащищенная укладка $\rho = 1$	Незащищенная укладка $\rho = 1,5$
1.5	23	19,5	20	19	30	26
2.5	32	26	26	25	40	36
4	42	35	33	32	51	45
6	54	44	43	41	65	56
10	75	60	59	55	88	78
16	100	80	76	72	114	101
25	127	105	100	93	148	130
35	158	128	122	114	178	157
50	192	154	152	141	211	185
70	246	194	189	174	259	227
95	298	233	226	206	311	274
120	346	268	260	238	355	311
150	399	300	299	272	394	345

Таблица 2. Ток класса «А» с составляющей гармоники 3-го порядка, не превышающей 15% (0,6/1 кВ, 4 жилы, 90 °С)

Площадь сечения (мм ²)	Воздух (30°C)		Земля (20°C)			
	Открытая проводка	Кабелепровод	Кабелепровод $\rho = 1$	Кабелепровод $\rho = 1,5$	Незащищенная укладка $\rho = 1$	Незащищенная укладка $\rho = 1,5$
1.5	20	17	17	16	26	22
2.5	28	22	22	22	34	31
4	36	30	28	28	44	39
6	46	38	37	35	56	48
10	65	52	51	47	76	67
16	86	69	65	62	98	87
25	109	90	86	80	127	112
35	136	110	105	98	153	135
50	165	132	131	121	181	159
70	212	167	163	150	223	195
95	256	200	194	177	267	236
120	298	230	224	205	305	267
150	343	258	257	234	339	297

Таблица 3. Ток класса «А» с составляющей гармоники 3-го порядка, не превышающей 33% (0,6/1 кВ, 4 жилы, 90 °С).

Площадь сечения (мм ²)	Воздух (30°C)		Земля (20°C)			
	Открытая проводка	Кабелепровод	Кабелепровод $\rho = 1$	Кабелепровод $\rho = 1,5$	Незащищенная укладка $\rho = 1$	Незащищенная укладка $\rho = 1,5$
1.5	15	12	13	12	19	17
2.5	20	17	17	16	25	23
4	27	22	21	20	32	29
6	34	28	27	26	41	36
10	48	38	38	35	56	50
16	64	51	48	46	73	64
25	81	67	64	59	94	83
35	101	82	78	73	113	100
50	122	98	97	90	134	118
70	157	124	120	111	165	145

95	190	148	144	131	198	175
120	220	171	166	152	226	198
150	254	191	190	173	251	220

Таблица 4. Ток класса «А» с составляющей гармоники 3-го порядка равной 45% (0,6/1 кВ, 4 жилы, 90 °С).

Размеры нейтрального провода в электросетях с сильными токами гармонических составляющих

Площадь сечения (мм ²)	Воздух (30°C)		Земля (20°C)			
	Открытая проводка	Кабелепровод	Кабелепровод $\rho = 1$	Кабелепровод $\rho = 1,5$	Незащищенная укладка $\rho = 1$	Незащищенная укладка $\rho = 1,5$
1.5	13	11	11	11	17	14
2.5	18	14	14	14	22	20
4	23	19	18	18	28	25
6	30	24	24	23	36	31
10	42	33	33	31	49	43
16	56	44	42	40	63	56
25	71	58	56	52	82	72
35	88	71	68	63	99	87
50	107	86	84	78	117	103
70	137	108	105	97	144	126
95	166	129	126	114	173	152
120	192	149	144	132	197	173
150	222	167	166	151	219	192

Таблица 5. Ток класса «А» с составляющей гармоники 3-го порядка равной 60% (0,6/1 кВ, 4 жилы, 90 °С).

Особое внимание нужно уделить бронированным кабелям или кабелям с металлическим экраном. Вклад гармоник в вихревые токи в экране или в броне могут быть значительными. Поэтому, во всех случаях, когда ожидаются искажения тока нагрузки, сечение нейтрального провода не должно быть меньше сечения соответствующих фазовых проводов. То же правило, без сомнения, касается и всех приспособлений цепи нейтрального провода.

Когда конструктивные размеры цепи нейтрального провода превышают размеры компонентов соответствующих фазовых проводов, что может произойти даже в стандартных электрических сетях, бывает трудно, если не невозможно, найти в продаже подходящие компоненты, которые можно было бы правильно включить в состав системы. Единственной подходящей альтернативой в таком случае является ограничение нагрузки или размера максимального сечения. Несомненно, защита для фазового провода уменьшенного сечения должна быть выбрана корректно.

На конечных участках сети необходимо предусмотреть отдельные нейтральные провода для каждой линии и отдельные цепи для каждой вносящей искажения нагрузки. Это также обеспечит максимальную электромагнитную независимость между компонентами, вносящими искажения, и компонентами, восприимчивыми к искажениям. Обеспечение максимально достижимой симметричности нагрузок позволит избежать последующего увеличения тока в нейтральном проводе в результате несимметричности нагрузок. Приведенные выше рекомендации так же важны и применимы к кабелям большого сечения, как и к кабелям малого сечения. Они также могут применяться, по крайней мере как хороший способ аппроксимации, к электрическим шинам.

Численный пример

Выполним расчеты для следующего примера: трехфазная сеть с номинальным током нагрузки 39 А прокладывается непосредственно в стене с помощью 4-жильного кабеля в ПВХ изоляции (70°C). В условиях отсутствия гармоник, общей практикой является использование кабеля с медными жилами сечением 6 мм² и пропускной способностью 41 А.

Если доля гармоники 3-го порядка составляет 20%, то, используя поправочный уменьшающий коэффициент 0,6, получаем эквивалентный ток нагрузки:

$$\frac{39.0}{0.86} = 45.4$$

для которого необходим кабель сечением 10 мм².

Если доля гармоники 3-го порядка составляет 40%, то сечение кабеля следует выбирать в соответствии с током в нейтральном проводе, который равен:

$$39 \times 0,4 \times 3 = 46,8 \text{ А}$$

Размеры нейтрального провода в электросетях с сильными токами гармонических составляющих

Применяя поправочный уменьшающий коэффициент 0,86, получаем номинальный ток кабеля:

$$\frac{46.8}{0.86} = 54.41$$

Так что для такой нагрузки также подойдет кабель сечением 10 мм².

Если доля гармоник 3-го порядка составляет 50%, то сечение кабеля также следует выбирать в соответствии с током в нейтральном проводе:

$$39 \times 0,5 \times 3 = 58,5 \text{ A}$$

В этом случае необходим кабель сечением 10 мм² (поправочный уменьшающий коэффициент равен 1).

Выводы

Обсуждение в данной статье показало, как общепринятые конструктивные решения, приемлемые в отсутствие сложностей, связанных с плохим качеством электроэнергии, становятся неверными, когда не выполняются лежащие в их основе теоретические положения. В этой связи не действуют допущения о том, что кривые изменения напряжений и токов имеют идеальную форму.

При определении сечения нейтрального провода, общепринятая «старая» практика дает площадь сечения меньшую или равную сечению соответствующих фазовых проводов и допускает применение схемы с одним общим нейтральным проводом для нескольких линий. С другой стороны, правильный анализ электромагнитных взаимодействий, возникающих в условиях нелинейной нагрузки, требует использования нейтрального провода с сечением большим или равным сечению соответствующих фазовых проводов, и это обосновано протекающим по нему фактическим током. Также необходимо применение для каждой линии отдельного нейтрального провода (в некоторых странах ранее это было обязательным). Численный пример показывает, что проблемы могут возникнуть как на важных участках сети с питающей стороны, так и на конечных участках любой электрической системы.

Справочная литература

- [1] P Chizzolini, P L Noferi: Ottimizzazione degli interventi sulla rete di distribuzione mirati al miglioramento della continuita' del servizio elettrico. LXXXVII Riunione AEI, Firenze 1986.
- [2] N Korponay, R Minkner: Analysis of the new IEC drafts for 185 (44-1) and 186 (44-2) instruments transformers in relation to the requirements of modern protection systems - Journée d' études: Les transformateurs de mesure E2-20 SEE novembre 1989.
- [3] T M Gruz: "A survey of neutral currents in three-phase computer power systems", IEEE Transaction on industry applications, vol. 26, n° 4 July/August 1990.
- [4] IEC 364-5-52 - Electrical Installations in Buildings - Part 5-52: Selection and Erection of Electrical Equipment – Wiring Systems.