

**ДГМА**

**Кафедра: ЭСА**

**КРАТКИЙ КУРС ЛЕКЦИЙ**

**ПО ДИСЦИПЛИНЕ:**

**«ПРОБЛЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ И  
ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ»**

**Краматорск 2010**

## Качество электрической энергии. Показатели качества электрической энергии.

Для количественной характеристики свойств электроэнергии, применительно к определенным условиям ее производств, передачи и потребления установлены следующие показатели.

При питании от электрических сетей однофазного тока:

1. Отклонение частоты;
2. Отклонение напряжения;
3. Размах колебаний частоты;
4. Размах колебаний напряжения;
5. Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения;

При питании от электрических сетей трехфазного тока:

1. Отклонение частоты;
2. Отклонение напряжения;
3. Размах колебаний частоты;
4. Размах колебаний напряжения;
5. Коэффициент обратной последовательности напряжения.

При питании от электрических сетей постоянного тока:

1. Отклонение напряжения;
2. Размах колебаний напряжения;
3. Коэффициент пульсации напряжения.

Предельные допустимые значения показателей качества электрической энергии нормированы ГОСТ 13109-67.

### Отклонение напряжения

Отклонение напряжения характеризуется показателем установившегося отклонения текущего значения напряжения  $U$  от номинального значения  $U_{ном}$ :

$$\delta U = (U - U_{ном}) \cdot 100 / U_{ном} [\%]$$

Отклонение напряжения обусловлено изменением потерь напряжения, вызываемых изменением мощностей нагрузок. Отклонение напряжения нормируется на выводах приемников электрической энергии:

$$\delta U_{у.норм} = \pm 5\% \text{ и } \delta U_{у.пред.} = \pm 10\%.$$

## Колебания напряжения

Колебания напряжения характеризуются размахом изменения напряжения  $\delta U_t$ , частотой повторения изменений напряжения  $F_{\delta U_t}$ , интервалом между изменениями напряжения  $\Delta t_{i, i+1}$ , дозой фликера  $P_t$ .

Источниками колебаний напряжения являются потребители электроэнергии с резкопеременным графиком потребления мощности (особенно реактивной). К ним относятся: дуговые сталеплавильные печи, электросварка, поршневые компрессоры и ряд других. При резком возрастании нагрузки происходит резкое увеличение потерь: напряжения в ветвях сети, питающих эту нагрузку. В результате резко уменьшается напряжение на приемном узле ветви. При резком уменьшении нагрузки происходит уменьшение потерь напряжения и, следовательно, увеличение напряжения на приемном узле ветви.

Отмечается, что в электрических сетях распространение колебаний напряжения происходит в направлении к шинам низкого напряжения практически без затухания, а к шинам высокого напряжения - с затуханием по амплитуде. Этот эффект проявляется в зависимости от мощности короткого замыкания  $S_{кз.сист.}$  системы. При распространении колебаний напряжения в любом направлении их частотный спектр сохраняется, а коэффициент затухания или усиления  $K_{\delta U_t}$  определяется соотношением

$$K_{\delta U_t} = 1 + U_{кз*} S_{кз.сист.} / S_{ном.т.}$$

где  $S_{кз.сист.}$  - мощность короткого замыкания ступени трансформации;  $S_{ном.т.}$  - номинальная мощность трансформатора;  $U_{кз*}$  - напряжение короткого замыкания трансформатора.

Таким образом, возникая в какой-либо точке электрической сети и распространяясь по ней, колебания напряжения оказывают отрицательное воздействие на чувствительные к ним электроприёмники, в основном на осветительные.

*Размах изменения напряжения* - разность между следующими друг за другом действующих значений напряжения любой формы, т. е. между следующими друг за другом максимальным и минимальным значениями огибающей действующих значений напряжения.

Огибающая действующих (среднеквадратичных) значений напряжения - ступенчатая временная функция, образованная действующими значениями напряжения, определенными на каждом полупериоде напряжения основной частоты.

Если огибающая действующих значений напряжения имеет горизонтальные участки (при спокойном графике нагрузки), то размах изменения напряжения

$\delta U_t$  определяется как разность между соседними экстремумом (максимумом  $U_{\max}$  или минимумом  $U_{\min}$ ) и горизонтальным участком или как разность между соседними горизонтальными участками (рис. 1):

$$\delta U_t = U_{\max} - U_{\min};$$

$$\delta U_t = (U_{\max} - U_{\min}) \cdot 100\% / U_{\text{ном}}$$

*Частота повторения изменения напряжения* - число одиночных изменений напряжения в единицу времени:

$$F_{\delta U_t} = m/T \text{ (1/с, 1/мин, 1/ч),}$$

где  $m$  - число изменений напряжения со скоростью изменения более 1 % в секунду за время  $T$ .

Длительность изменения напряжения  $\Delta t_{i, i+1}$  - интервал времени от начала одиночного изменения напряжения до его конечного значения (рис. 1).

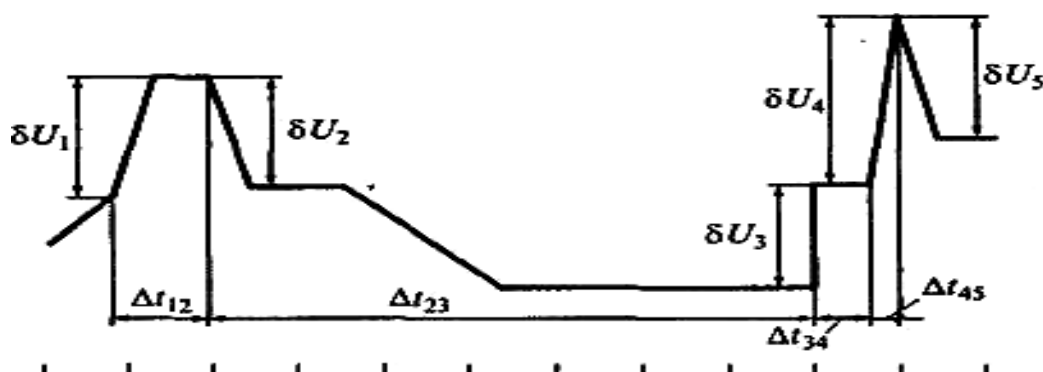


Рис. 1 - Колебания напряжения (пять размахов изменений напряжения)

*Фликер* (мерцание) - субъективное восприятие человеком колебаний светового потока искусственных источников освещения, вызванных колебаниями напряжения в электрической сети, питающей эти источники.

*Доза фликера  $P_t$*  - мера восприимчивости человека к действию фликера за установленный промежуток времени, т. е. интегральная характеристика колебаний напряжения, вызывающих у человека накапливающееся за установленный период времени раздражение мерцаниями (миганиями) светового потока.

Дозу фликера напряжения в процентах в квадрате вычисляют по выражению

$$P_t = 1/T_{\text{о.ср}} \int \sum g^2_f \delta U^2_f dt,$$

где  $\delta U_f$  - действующие значения составляющих разложения в ряд Фурье изменений напряжения с размахом  $\delta U_t$ ;  $g_f$  - коэффициент приведения действительных размахов изменения напряжения к эквивалентным;

$T_{\text{оср}} = 10$  мин - интервал времени осреднения.

Время восприятия фликера - минимальное время для субъективного восприятия человеком фликера, вызванного колебаниями напряжения.

Предельно допустимое значение для кратковременной дозы фликера  $P_{st}$  при колебаниях напряжения равно 1,38, а для длительной дозы фликера  $P_{lt}$  при тех же колебаниях напряжения равно 1,0.

Кратковременную дозу фликера определяют на интервале времени наблюдения, равном 10 мин. Длительную дозу фликера определяют на интервале времени наблюдения, равном 2 ч.

Предельно допустимое значение для кратковременной дозы фликера  $P_{st}$  в точках общего присоединения потребителей электрической энергии, располагающих лампами накаливания в помещениях, где требуется значительное зрительное напряжение, равно 1,0, а для длительной дозы фликера  $P_{lt}$  в этих же точках равно 0,74.

### Несинусоидальность напряжения

Несинусоидальность напряжения появляется потому, что в кривой напряжения, помимо гармоник основной частоты  $U_{(1)} = U_{\text{ном}}$ , имеют место гармоники  $U_{(n)}$  других высших частот, кратных основной частоте ( $n = 2, 3, 4, \dots, \infty$ ). Гармоники  $U_{(n)}$  обычно определяются разложением кривой фактического напряжения в ряд Фурье.

Причиной возникновения несинусоидальности напряжения является наличие потребителей электроэнергии с нелинейной вольт-амперной характеристикой. Основной вклад в несинусоидальность напряжения вносят тиристорные преобразователи электрической энергии, получившие широкое распространение в промышленности.

Несинусоидальность напряжения характеризуется следующими показателями:

коэффициентом искажения синусоидальности кривой напряжения;

коэффициентом  $n$ -й гармонической составляющей напряжения.

Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения  $K_u$ , %, является отношением суммарного действующего значения всех высших гармоник к действующему значению напряжения основной гармоники, причем  $n > 2$ :

$$K_u = \frac{\sqrt{\sum U_{(n)}^2}}{U_{\text{ном}}} 100$$

При определении коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения допускается не учитывать гармонические составляющие порядка  $n > 40$  или действующее значение которых менее 0,3 от  $U_{(1)}$

Коэффициент  $n$ -й гармонической составляющей  $K_{U(n)}$ , %, является отношением действующего значения напряжения  $n$ -й гармоники  $U_{(n)}$  к действующему значению напряжения первой гармоники:

$$K_{U(n)} = 100 \cdot U_{(n)} / U_{\text{ном}}$$

Таблица 1

**Значения коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения, %**

Нормально допустимое значение при $U_{\text{ном}}$ , кВ				Предельно допустимое значение		
0,38	6...20	35	110...330	0,38	6...20	35
8,0	5,0	4,0	2,0	12,0	8,0	6,0

Нормально допустимые и предельно допустимые значения коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения в точках общего присоединения к электрическим сетям с разными номинальными напряжениями приведены в табл. 1.

Нормально допустимые значения коэффициента  $n$ -й гармонической составляющей напряжения в точках общего присоединения к электрическим сетям с разными номинальными напряжениями  $U_{\text{ном}}$  приведены в табл. 2.

Предельно допустимое значение коэффициента  $n$ -й гармонической составляющей напряжения вычисляют по формуле

$$K_{U(n)\text{пред.}} = 1,5 \cdot K_{U(n)\text{норм.}}$$

где  $K_{U(n)\text{норм.}}$  - нормально допустимое значение коэффициента  $n$ -й гармонической составляющей напряжения, определяемое по табл. 2.

Таблица 2

**Допустимые значения коэффициента n-й гармонической составляющей напряжения, %**

n1	При U <sub>НОМ</sub> , кВ				n2	При U <sub>ННМ</sub> , кВ				n3	При U <sub>НОМ</sub> , кВ.		
	0,38	6... 20	35	110... 330		0,38	6... 20	35	110... 330		0,38	6... 20	35
5	6,0	4,0	3,0	1,5	3	5,0	3,0	3,0	1,5	1	2,0	1,5	1,0
7	5,0	3,0	2,5	1,0	9	1,5	1,0	1,0	0,4	4	1,0	0,7	0,5
11	3,5	2,0	2,0	1,0	15	0,3	0,3	0,3	0,2	6	0,5	0,3	0,3
13	3,0	2,0	1,5	0,7	21	0,2	0,2	0,2	0,2	8	0,5	0,3	0,3
17	2,0	1,5	1,0	0,5	>21	0,2	0,2	0,2	0,2	10	0,5	0,3	0,3
19	1,5	1,0	1,0	0,4						12	0,2	0,2	0,2
23	1,5	1,0	1,0	0,4						>12	0,2	0,2	0,2
25	1,5	1,0	1,0	0,4									
>25	0,2+	0,2+	0,2+	0,2+									
	+1,3	+0,8	+0,6	+0,2									
	•25/n	•25/n	•25/n	•25/n									

Примечания. 1.  $n_i$  - номер гармонической составляющей напряжения;  $n_1$  - нечётные гармоники, не кратные 3;  $n_2$  - нечетные, кратные 3;  $n_3$  - четные.

### Несимметрия напряжения

Несимметрия трехфазной системы напряжений появляется при наличии в трехфазной электрической сети напряжений обратной и нулевой последовательностей, значительно меньших по величине соответствующих составляющих напряжения прямой (основной) последовательности.

Основной причиной возникновения несимметрии напряжения являются потребители с несимметричным потреблением мощности по фазам. К ним относятся: однофазные потребители, включаемые на фазное либо междуфазное напряжения; трехфазные потребители с несимметричным потреблением мощности по фазам (в частности, дуговые сталеплавильные печи, сварочные установки). Причиной несимметрии напряжений может быть также несимметрия сопротивлений сети по фазам.

Несимметрия трехфазной системы напряжений характеризуется коэффициентами несимметрии обратной последовательности  $K_{2U}, \%$  и нулевой последовательности  $K_{0U}, \%$ , которые представляют собой отношение

действующего значения напряжения соответственно обратной и нулевой последовательности к действующему значению напряжения прямой последовательности (к номинальному напряжению):

$$K_{2U} = 100 \cdot U_{2(1)} / U_{\text{ном}};$$

$$K_{0U} = 100 \cdot U_{0(1)} / U_{\text{ном}},$$

где  $U_{2(1)}$  и  $U_{0(1)}$  — действующие значения напряжения соответственно обратной и нулевой последовательностей основной частоты трехфазной системы напряжений, В и кВ.

Допустимые значения этих показателей следующие: в нормальном режиме  $K_{2U_{\text{норм}}} = K_{0U_{\text{норм}}} = 2\%$ ; предельно допустимые нормы  $K_{2U_{\text{пред}}} = K_{0U_{\text{пред}}} = 4\%$ .

### Провал напряжения

Провал напряжения - внезапное значительное снижение напряжения в точке электрической сети ниже  $0,9 U_{\text{ном}}$ , за которым следует восстановление напряжения до первоначального или близкого к нему уровня через промежуток времени от десяти миллисекунд до нескольких десятков секунд.

Провал напряжения характеризуется глубиной  $\delta U_{\text{п}}$  (по отношению к значению напряжения в нормальном режиме) и длительностью  $\Delta t_{\text{п}}$ .

Провал напряжения:

$$\delta U_{\text{п}} = U_{\text{ном}} - U_{\text{мин}}, \text{ или } \delta U_{\text{п}} = 100 \cdot (U_{\text{ном}} - U_{\text{мин}}) / U_{\text{ном}}.$$

Длительность провала напряжения  $\Delta t_{\text{п}}$  - интервал времени между начальным моментом провала напряжения  $t_{\text{н}}$  и моментом восстановления напряжения до первоначального или близкого к нему уровня

$$\Delta t_{\text{п}} = t_{\text{н}} \cdot t_{\text{к}}.$$

Глубина провала напряжения может изменяться от 10 до 100%, длительность - от сотых до нескольких десятых секунды (в некоторых случаях - секунды).

Вспомогательной характеристикой является частота появления провалов напряжения  $F_{\text{п}}$  - число провалов напряжения определенной глубины и длительности за определенный промежуток времени по отношению к общему числу провалов за этот же промежуток времени.

Основной причиной появления провалов напряжения в системе



электроснабжения являются короткие замыкания в отходящих от цепи питания данного узла нагрузки ответвлениях электрической сети высокого (35...220 кВ), среднего (6... 10 кВ) напряжений и в сетях с напряжением до 1 кВ.

Провалы напряжения не нормируются, поскольку они неизбежны настолько насколько неизбежны короткие замыкания. Однако знать статистику по частоте, глубине и длительности провалов напряжения в системе электроснабжения необходимо для аргументированного использования агрегатов и источников бесперебойного питания с целью электроснабжения особенно чувствительных к провалам напряжения потребителей. К ним относятся: электронные микропроцессорные устройства управления, компьютеры, серверы и ряд других.

### Импульсное напряжение

Искажение формы кривой питающего напряжения может происходить за счет появления высокочастотных импульсов при коммутациях сети, работе разрядников и т. п.

Импульс напряжения - резкое изменение напряжения в точке электрической сети, за которым следует восстановление напряжения до первоначального или близкого к нему уровня за промежуток времени до нескольких миллисекунд (т.е. меньше полупериода) (рис. 2).

Импульсное напряжение характеризуют следующие величины:

амплитуда импульса  $U_{\text{имп}}$  - максимальное мгновенное значение импульса напряжения;

длительность импульса - интервал времени между начальным моментом импульса напряжения и моментом восстановления мгновенного значения напряжения до первоначального или близкого к нему уровня; часто длительность импульса оценивается по уровню 0,5 его амплитуды  $\Delta t_{\text{имп}0,5}$

В электрическую сеть напряжением 220...380 В может проникать импульсное напряжение до 3... 6 кВ.

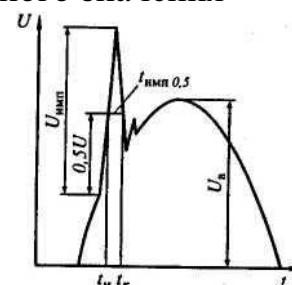


Рис.2 - Импульс напряжения

Наиболее чувствительны к импульсным напряжениям электронные и микропроцессорные элементы систем управления и защиты, компьютеры, серверы и компьютерные станции.

Основным способом защиты от импульсных напряжений является использование ограничителей перенапряжения (ОПН) на основе металлооксидных соединений.

## Влияние несимметрии напряжения на работу электроприемников

Несимметрия напряжения значительно ухудшает режимы работы многофазных вентильных выпрямителей. В результате различия напряжения по фазам значительно увеличивается пульсация выпрямленного напряжения. Значительное отрицательное влияние симметрия напряжения может оказывать на систему импульсно-фазового управления тиристорных преобразователей.

Конденсаторные установки при несимметрии напряжений не равномерно загружаются реактивной мощностью по фазам, что делает невозможным полное использование установленной мощности. Кроме того, конденсаторные установки в этом случае усиливают уже существующую несимметрию, так как выдача реактивной мощности в сеть в фазе с наименьшим напряжением будет меньше, чем в остальных фазах (пропорционально квадрату напряжения).

Несимметрия напряжения значительно влияет и на однофазные потребители. Если фазные напряжения неодинаковы, то, например, лампы накаливания, подключенные к фазе с более высоким напряжением, имеют больший световой поток, но значительно меньший срок службы по сравнению с лампами, подключенными к меньшим напряжением.

## Влияние несинусоидальности напряжения на работу электроприемников

Для оценки влияния напряжения высших гармоник на напряжение в сети рассмотрим, как меняется мгновенное (или действующее) значение напряжения на зажимах электроприемника в этом случае (рис. 3).

Допустим, что в сети появляется напряжение высшей гармоники с порядковым номером 2 (вторая гармоника), очевидно, что возрастает амплитудное значение напряжения, а также его действующее значение.

Воздействие тока второй гармоники ( $f = 100$  Гц) аналогично воздействию обратной последовательности, тока третьей гармоники ( $f = 150$  Гц) - появлению нулевой последовательности. При появлении тока гармоники с большим порядковым номером проявляется поверхностный эффект (вытеснение тока к поверхности проводника), что приводит к дополнительным потерям тепла, нагреву изоляции электрооборудования и снижению срока его службы.

В целом несинусоидальные режимы обладают теми же недостатками, что и

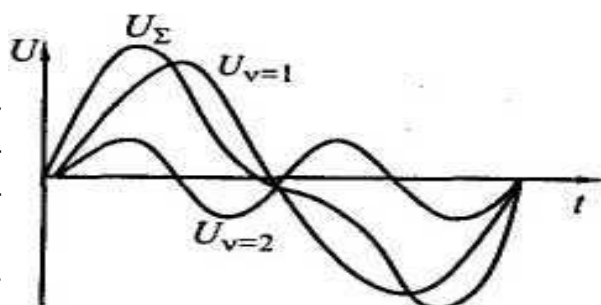


Рис. 3 - Влияние напряжения высшей гармоники на результирующее напряжение сети

несимметричные. Однако несинусоидальные токи приводят к большему дополнительному нагреву вращающихся машин, а также к большему дополнительному нагреву и увеличению диэлектрических потерь в конденсаторах, кабелях.

Проникновение высших гармоник в сеть приводит к нарушениям работы устройств телемеханики, автоматики, релейной защиты. В сети возможно возникновение резонансных режимов на высших гармониках, при этом резко возрастают токи и напряжения на отдельных участках сети.