

Электромагнитная совместимость.

Искажение напряжения в узле питающей сети от влияния генераторов ТПЧ.

Выбор входного кабеля ТПЧ-5.

1. Генераторы ТПЧ мощностью $P_{\text{вых}} > 400$ кВт рекомендуется подключать к мощной высоковольтной сети через понижающий трансформатор, на выходе которого получают индивидуальную сеть питания, где другие электро-потребители не подсоединяются. В индивидуальной сети искажения напряжения не нормируются стандартами. В этом случае согласовывается мощность трансформатора и выходная мощность генератора ТПЧ, при котором обеспечивается надежная длительная работа. В качестве трансформатора используется специальный, т.н. преобразовательный трансформатор, который рассчитан на подключение полупроводникового выпрямителя.

Генераторы ТПЧ мощностью $P_{\text{вых}} < 400$ кВт допускается подключать к узлу сети соответствующей мощности, где искажения напряжения в этом узле должны нормироваться международным стандартом ГОСТ 13109-97.

2. Сеть характеризуется реактивными мощностями короткого замыкания:

$$S_{k1} = 3 * U_a^2 / \omega * L_{a1}, \quad (1)$$

$$S_{k2} = 3 * U_a^2 / \omega * L_{a2}, \quad (2)$$

где

$\omega = 2 * \pi * f_s$ – угловая частота питающей сети ($f_s = 50; 60$ Гц);

$\omega * L_{a1}$ – реактанс сети;

$\omega * L_{a2}$ – реактанс входного кабеля ТПЧ, который подсоединяется к узлу сети, куда могут подсоединяться также другие электро-потребители;

L_{a1} – внутренняя фазная индуктивность сети, распространяющаяся до узла, куда подсоединяется кабель ТПЧ;

L_{a2} – фазная индуктивность кабеля ТПЧ;

$L_a = L_{a1} + L_{a2}$ – полная фазная индуктивность;

U_a – фазное напряжение сети;

S_{k1} – реактивная мощность (кВА) трехфазного короткого замыкания сети в точке подключения кабеля;

S_{k2} – реактивная мощность (кВА) трехфазного короткого замыкания кабеля.

В формулах (1) и (2) учитываются только реактивные сопротивления $\omega * L_{a1}$ и $\omega * L_{a2}$, т.к. только реактивное сопротивление влияет на искажение сети. Активное сопротивление может повлиять только на потерю напряжения в генераторе ТПЧ до нескольких процентов, но практически никак не сказывается на увеличении высших гармоник в сети.

3. Влияние генератора ТПЧ на сеть характеризуется соотношениями мощностей, которые выражаются в процентах:

$$X_1 = 100\% * P_{\text{вых}} / S_{k1}, \quad (3)$$

$$X_2 = 100\% * P_{\text{вых}} / S_{k2}, \quad (4)$$

Выражения (3) и (4) после подстановке (1) и (2) можно представить в раскрытой форме:

$$X_1 = 100\% * P_{\text{вых}} * \omega * L_{a1} / (3 * U_a^2), \quad (5)$$

$$X_2 = 100\% * P_{\text{вых}} * \omega * L_{a2} / (3 * U_a^2), \quad (6)$$

откуда

$$L_{a1} = 3 * X_1 * U_a^2 / (100 * P_{\text{вых}} * \omega), \quad (7)$$

$$L_{a2} = 3 * X_2 * U_a^2 / (100 * P_{\text{вых}} * \omega). \quad (8)$$

Величина X_1 – это относительный реактанс сети, обозначаемый с заглавной буквы X , чтобы отличить его от абсолютного реактанса, обозначаемого с прописной буквы $x_1 = \omega \cdot La_1$. Соответственно, X_2 – это относительный реактанс кабеля.

Рабочие зоны для реактансов X_1 и X_2 учитываются при проектировании фильтра в звене постоянного тока ТПЧ-5, а также должны быть учтены потребителем при подключении ТПЧ-5, чтобы не превысить допустимое искажение сети.

4. У кабелей полное фазное сопротивление, включающее активную составляющую $Z_{a2} = \sqrt{Ra_2^2 + (\omega \cdot La_2)^2}$ обычно существенно выше, чем реактивное сопротивление $\omega \cdot La_2$ (возможные соотношения $Ra_2 / \omega \cdot La_2 = 0.6 \div 6.7$ смотрите в п.11, Табл.4). Соответственно, полная мощность короткого замыкания кабеля $3 \cdot U_a^2 / Z_{a2}$ обычно существенно ниже реактивной мощности короткого замыкания кабеля Sk_2 по формуле (2).

У мощных сетевых трансформаторов полное фазное сопротивление $Z_{a1} = \sqrt{Ra_1^2 + (\omega \cdot La_1)^2}$ почти равно (для больших мощностей) реактивному сопротивлению $\omega \cdot La_1$, примерное соотношение $Z_{a1} / \omega \cdot La_1 = 1.05 \div 1.1$. Поэтому полная мощность короткого замыкания сети $3 \cdot U_a^2 / Z_{a1}$ примерно на $5 \div 10\%$ ниже реактивной мощности короткого замыкания Sk_1 по формуле (1).

Например, если реактивная мощность сети $Sk_1 = 30$ МВА, то полная мощность короткого замыкания сети равна примерно 27 МВА, а номинальная (активная) мощность сети равна примерно $P_a = 1.5$ МВт (из расчета типичного 5.5% -го напряжения короткого замыкания у силовых трансформаторов). Далее в этом примере, если взять равными активные мощности генератора и сети $P_{вых} = P_a$, то $P_{вых} / Sk_1 = 0.05$, т.е. получим $X_1 = 5\%$. Такое значение $X_1 = 5\%$ можно допустить в случае использования индивидуального сетевого трансформатора – см. п.1. Для общих сетей значение X_1 обычно в несколько раз ниже.

Например, в Германии ограничивается отношение мощностей вентильного преобразователя к мощности замыкания сети в узле на уровне 1%. Следовательно, если считать полную и реактивную мощности примерно одинаковыми (для больших мощностей), то ограничение X_1 также на уровне 1%.

5. В данной работе определены рабочие зоны для реактансов X_1 и X_2 на основе статистических исследований используемых в практике сетей. Исследования проведены для выборки 28 генераторов ТПЧ 4-го поколения от 18 городов по всем регионам РФ от Восточной Сибири до Ленинградской области. Результаты исследования опубликованы на сайте производителя ТПЧ-5 в файле: <http://www.aljuel.eu/Archive1/Diagnostics/c5-statistics.xls>

В выборке рассматривались генераторы с номинальной мощностью нагрузки $P_{вых} = 40 \div 350$ кВт с номинальными частотами $f_{вых} = 1.0; 2.5; 4.0; 8.0; 10.0$ кГц, запитанные от сетей 3×380 В, 50Гц. Задача статистического исследования состояла в том, чтобы определить, какие реактансы X_1 и X_2 встречаются в практике и обобщить результаты, что необходимо для рационального проектирования фильтра высших гармоник. Значения реактансов X_1 и X_2 показаны на диаграмме в координатах X_1 – абсцисса, X_2 – ордината (Рис.1). Каждый объект из 28 объектов выборки на Рис.1 показан отдельной точкой (кружочком).

Сети, по степени влияния генераторов ТПЧ на искажения напряжения, можно условно подразделить на три категории:

- слабое влияние ТПЧ, низкий реактанс сети, % $0 < X_1 < 1.6$, 26 объектов, разброс $X_1 = 0.08 \div 1.4$;
- среднее влияние ТПЧ, средний реактанс сети, % $1.6 < X_1 < 2.8$, 2 объекта, разброс $X_1 = 1.8 \div 2.1$;
- сильное влияние ТПЧ, высокий реактанс сети, % $2.8 < X_1$, нет объектов в выборке.

Область низкого реактанса сети со слабым влиянием ТПЧ ограничена на Рис.1 справа прямой $X_1 = 1.6\%$. В эту область чаще всего попадают сравнительно маломощные генераторы ТПЧ (порядка 250 кВт и менее), подключаемые к достаточно мощной сети (активная мощность $P_a = 1$ МВт и более).

Область среднего реактанса сети располагается между прямыми $X_1 = 1.6\%$ и $X_1 = 2.8\%$. Сюда попадают среднечастотные ТПЧ порядка 320...400кВт, подключаемые к сетям порядка $P_a = 1$ МВт.

Область высокого реактанса сети располагается левее прямой $X_1 = 2.8\%$. Сюда попадают ТПЧ, подключаемые к маломощным сетям с большим реактансом. Теоретически сюда могли бы попасть мощные ТПЧ, подключаемые к мощным сетям. Но этого не происходит, т.к. мощные ТПЧ подключаются через индивидуальный трансформатор, у которого искажения напряжения не нормируются, см. п.1.

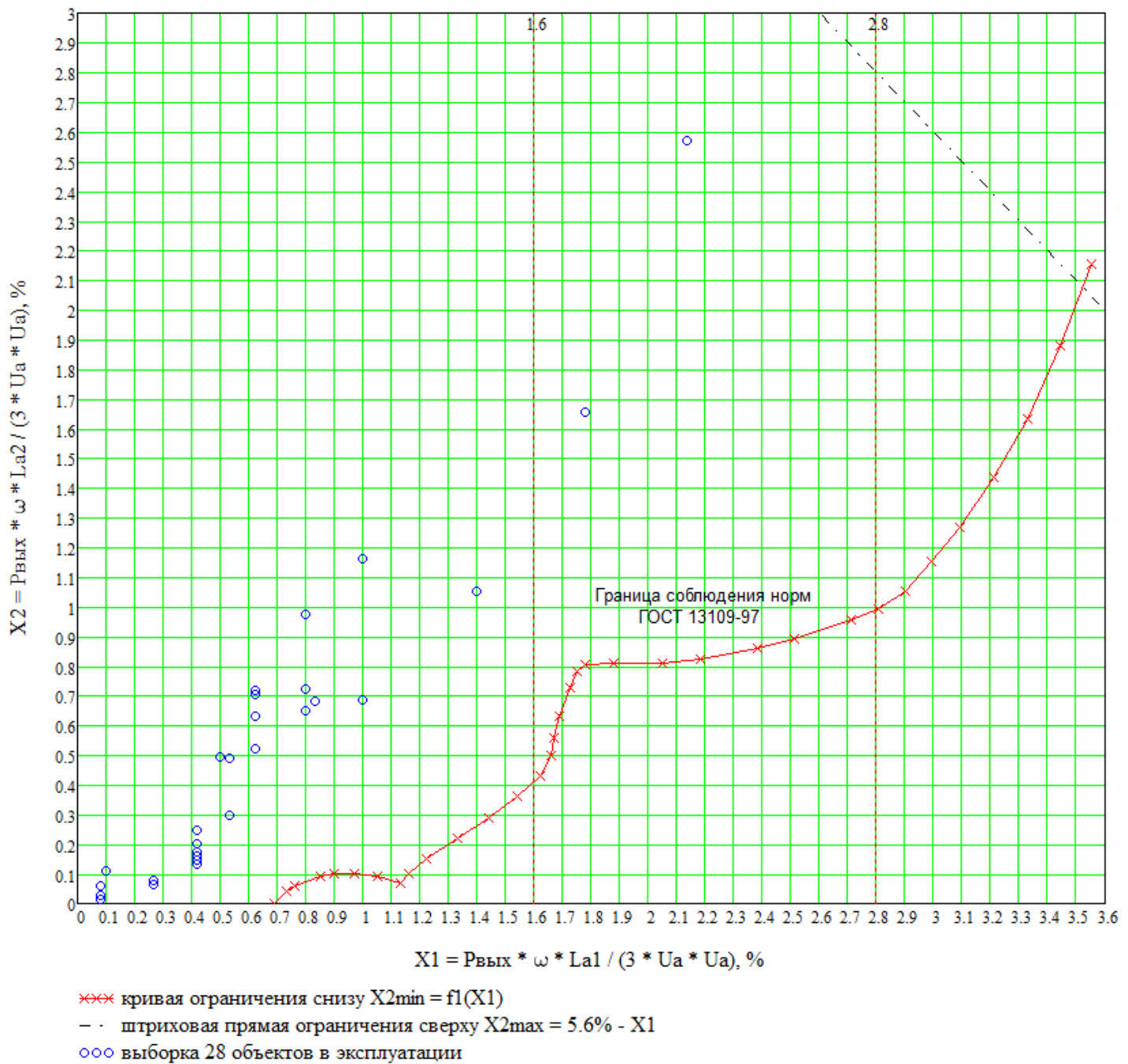


Рис.1. Область допустимого реактанса $X2$ входного кабеля ТПЧ-5, с точки зрения влияния на питающую сеть, в зависимости от реактанса сети $X1$

Задача исследования также состояла в том, чтобы определить, выполняются ли нормы международного стандарта ГОСТ 13109-97 для генераторов ТПЧ старых поколений до 4-го, находящихся в эксплуатации (см. пункты 8 и 9).

Исследования использованы для рационального проектирования силового фильтра высших гармоник в ТПЧ-5 пятого поколения.

6. По результатам расчетов на математической модели ТПЧ-5 получено ограничение снизу области изменения реактанса кабеля – кривая $X2_{\text{min}} = f1(X1)$, смотрите Рис.1. Кривая построена из расчета соблюдения норм допустимых искажений сети по ГОСТ 13109-97. Расчет выполнялся применительно к силовому фильтру в генераторе ТПЧ-5.

Кривая $X2_{\text{min}} = f1(X1)$ построена по точкам, каждая из которых отмечена крестиком. Каждая точка – это граница, где соблюдается допустимая норма искажения в сети. Нормы прописываются в ГОСТ 13109-97 для каждой гармоники отдельно и для суммарного среднеквадратичного коэффициента KU . Сложная форма кривой $X2_{\text{min}} = f1(X1)$ связана с тем, что на различных участках аргумента $X1$ активной становится та или иная норма.

На участке $X1 < 0.69\%$ нет ограничения для реактанса $X2$, т.е. все нормы выполняются для любого значения $X2 > 0$. Далее, в диапазоне $X1 = 0.69...1.05\%$ задействована норма гармоник с номером 11. Затем, при дальнейшем изменении $X1$, активны (в произвольном порядке) нормы для гармоник с номерами 5, 7, 13, а также норма для среднеквадратичного коэффициента $KU=8\%$. Нормы для высоких номеров гармоник, выше 13, всегда не активны (есть запас) во всем диапазоне изменения $X1$, т.к. в ТПЧ-5 имеется фильтр высших гармоник.

7. В области высокого реактанса $X1$, кроме нижнего ограничения $X2_{\min} = f1(X1)$, существует верхнее ограничение – наклонная вниз штриховая прямая, где сумма реактансов является константой $X1+X2=5.6\%$. Соответственно, фазная индуктивность является константой $La=La1+La2=const$. Верхняя граница ($X2_{\max} = 5.6\% - X1$) не имеет отношения к искажению сети – это только рекомендация для эффективного использования генератора ТПЧ. На этой границе эффективность ТПЧ снижается вследствие потери напряжения в звене постоянного тока (5% и более). На столько же процентов теряется выходная мощность генератора. Потеря напряжения связана в основном с падением напряжения на активном сопротивлении кабеля, а также (в меньшей степени) связана со сдвигом фаз первых гармоник тока и напряжения вследствие реактивного сопротивления фазы. Верхняя граница ($X2_{\max} = 5.6\% - X1$) получена исходя из соотношения $Ra2/\omega*La2 = 1.3$, которое взято из примера, рассмотренного в п.12). Если взять соотношение больше 1.3, то потеря напряжения будет еще больше (сумма $X1+X2$ станет ниже 5.6%, штриховая прямая сдвинется вниз).

Область изменения реактансов $X1$ и $X2$ можно представить в табличной форме – смотрите Табл.1. Значения $X1$ и $X2$ из Табл.1 используются для расчета допустимой индуктивности входного кабеля ТПЧ-5 по формуле (8). Наиболее широкий диапазон выбора кабеля для сети с низким реактансом, а наиболее узкий выбор – для сети с высоким реактансом, где действуют ограничения снизу и сверху.

Табл.1. Диапазон выбора реактанса $X2$ входного кабеля ТПЧ-5, с точки зрения влияния на питающую сеть, в зависимости от реактанса сети $X1$

№	Категория	$X1 = P_{\text{вых}} * \omega * La1 / (3 * Ua^2), \%$	$X2 = P_{\text{вых}} * \omega * La2 / (3 * Ua^2), \%$
1	Низкий реактанс сети $X1$	менее 1.6	более 0.4
2	Средний реактанс сети $X1$	1.6 ÷ 2.8	более 1.0
3	Высокий реактанс сети $X1$	более 2.8	По Рис.1: минимум – кривая $X2_{\min} = f1(X1)$, максимум – прямая $X2 = 5.6\% - X1$

8. Рассмотрено искажение напряжения сети для генераторов ТПЧ 4-го поколения, представленных в выборке (28 объектов). Генераторы ТПЧ старых поколения до 4-го не имеют фильтра высших гармоник. В токе реактора содержатся пульсации на удвоенной частоте инвертора. Точно такие же пульсации содержатся в фазном токе питающей сети, что приводит к недопустимому искажению фазного и линейного напряжений. Нарушаются нормы для гармоник с номерами в окрестности удвоенной частоты инвертора. На соблюдение норм влияет коэффициент KL делителя высших гармоник:

$$KL = 100\% * La1 / (La1+La2+Ld), \quad (9)$$

где $Ld = 1600\mu H$ – индуктивность реактора, для всей выборки (28 объектов) одна и та же. Поскольку полная фазная индуктивность $La1+La2$ на два порядка меньше Ld , то она почти не влияет на KL – смотрите (9). Потребляемая номинальная мощность нагрузки в выборке при номинальном выходном напряжении ТПЧ варьируется от 40 до 320 кВт, но это тоже почти не влияет на искажения сети, т.к. высокочастотные пульсации тока одинаковые при одинаковой индуктивности реактора. Принципиальное значение имеет только индуктивность сети $La1$ в числителе коэффициента KL делителя высших гармоник (9).

В выборке максимальное значение $KL_{\max} = 1.85\%$, а минимальное значение $KL_{\min} = 0.48\%$. Нарушение норм искажений сети для крайних значений KL_{\max} и KL_{\min} рассмотрено в п.9.

9. Для подробного рассмотрения взят из выборки объект ТПЧ 4-го поколения с максимальным нарушением норм искажений в сети ($KL_{\max} = 1.85\%$). Выводы относятся также ко всем старым ТПЧ (3-го, 2-го и 1-го поколений), т.к. у всех старых ТПЧ нет фильтра высших гармоник. Основные параметры, определяющие искажение в сети:

- номинальная мощность $P_{\text{вых}}=320$ кВт;

- номинальная частота $f_{\text{вых}}=1$ кГц;
- сеть 50 Гц, 3 x 380В, $U_a=220$ В;
- выпрямитель открыт, номинальное напряжение $U_{\text{вых}}=800$ В;
- индуктивность реактора $L_d = 1600\mu\text{H}$;
- $X_1 = 2.1\%$, $L_{a1} = 31\mu\text{H}$;
- $X_2 = 2.5\%$, $L_{a2} = 37\mu\text{H}$.

На Рис.2 показаны формы фазного U_a и линейного U_{ab} напряжений в узле сети, куда подсоединяется кабель ТПЧ. На Рис.3 показаны нормы (сплошной линией) по ГОСТ 13109-97 для трех групп гармоник по отдельности: а) для группы нечетных (кроме кратных трем); б) для группы кратных трем; в) для группы четных (кроме кратных трем). Кружочками показаны, рассчитанные на модели, относительные амплитуды гармоник фазного напряжения по отношению к амплитуде первой гармоники.

Пульсации тока в реакторе происходят с удвоенной частотой инвертора, в данном случае 2 кГц, что в 40 раз больше частоты сети. Такие же пульсации тока присутствуют в фазном токе питающей сети и вызывают искажение фазного напряжения, что видим на Рис.2. Можно ожидать, что гармоники с номерами в окрестности 40 имеют повышенную амплитуду. Действительно, у пяти гармоник нарушены нормы, номера 33, 39, 41, 45, 51, максимальное нарушение у гармоники кратной трем, номер 39: относительная амплитуда 2.7%, что в 13.5 раз превышает норму 0.2%.

Если уменьшить частоту инвертора на 1% (на выходе 990 Гц, пульсации тока – 1980 Гц), то нарушатся нормы теперь уже у 9 гармоник, номера 32, 36, 38, 39, 40, 41, 42, 44, 45. Максимальное нарушение по-прежнему у гармоники кратной трем – номер 39, однако нарушение у нее теперь чуть меньше (в 12 раз).

Если частоту инвертора изменить в другую сторону, увеличить на 1% (на выходе 1010 Гц, пульсации тока – 2020 Гц), то нарушаются нормы теперь у 12 гармоник, номера 33, 36, 38, 39, 40, 41, 42, 44, 45, 51, 57, 63. Максимальное нарушение нормы у гармоник 39 и 40, у обоих в 9 раз.

Таким образом, в окрестности удвоенной частоты инвертора могут быть нарушены нормы у гармоник, число которых может доходить до 12. Максимальное нарушение нормы отдельной гармоники может доходить до 13 кратного. Причем, чем меньше максимальное нарушение отдельной гармоники, тем больше число нарушенных гармоник, и наоборот.

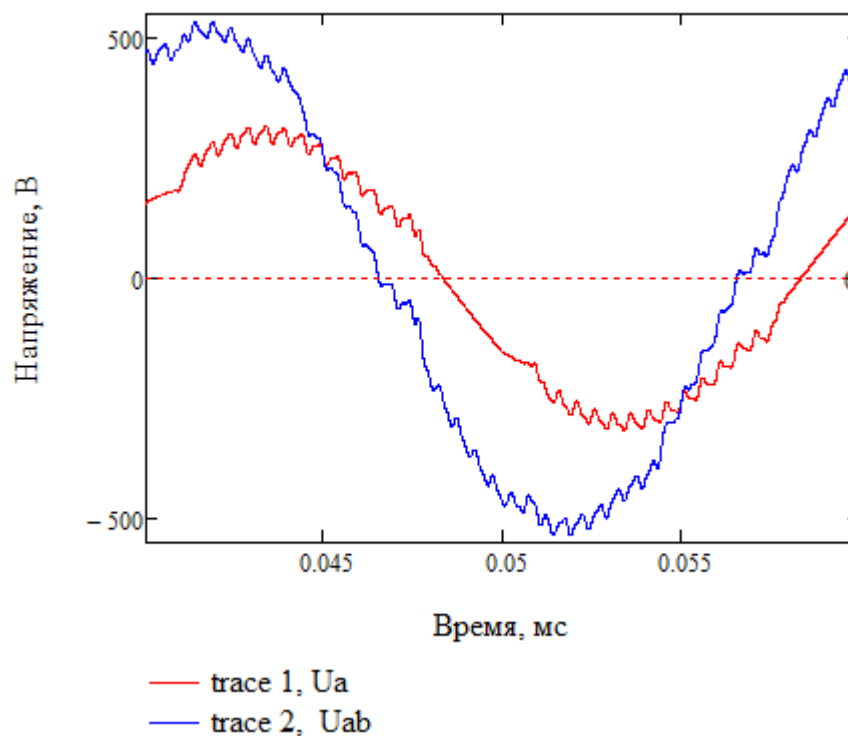
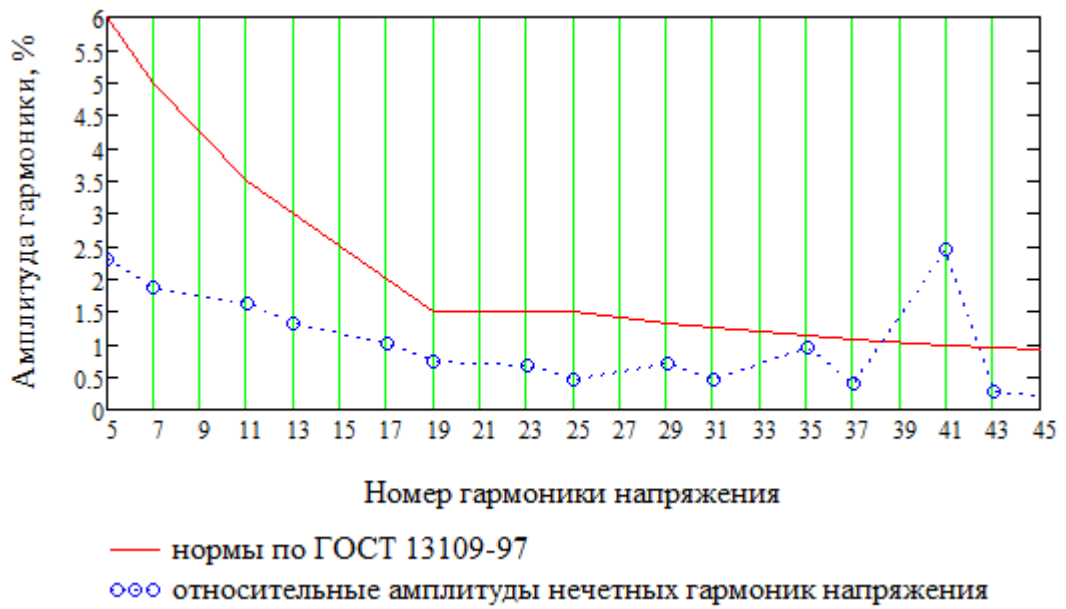
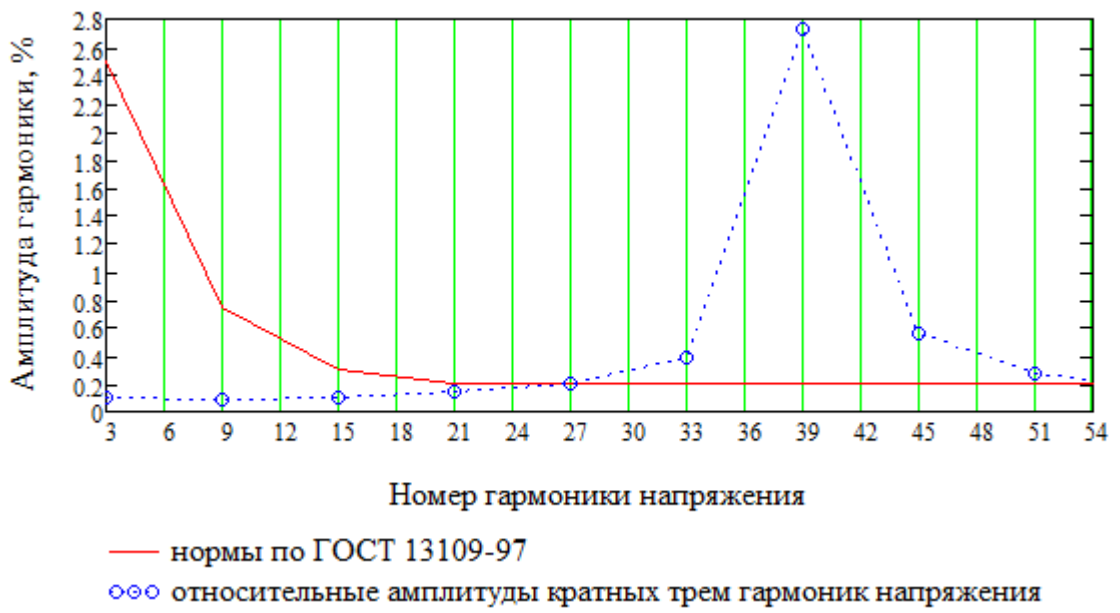


Рис.2. Расчетные оциллограммы фазного U_a и линейного U_{ab} напряжений в узле сети, куда подсоединяется кабель ТПЧ до 4-го поколения



а)



б)



в)

Рис.3. Относительные амплитуды гармоник фазного U_a напряжения, по отношению к первой гармонике, для ТПЧ до 4-го поколения: а) нечетные; б) кратные трем; в) четные

Для рассмотренных трех случаев частоты инвертора 990; 1000; 1010 Гц получен среднеквадратичный коэффициент искажений по всем гармоникам: $KU = 5.4; 5.0; 4.8 \%$, соответственно. Значение KU находится на границе допустимого (5%) по старому ГОСТ-у 13109-67, действовавшему до 1.01.1999 года, где не оговаривались нормы отдельных гармоник.

Анализ выполнен также для случая минимальных искажений сети – в выборке взят вариант, где индуктивность сети $La1$ минимальна ($KL_{min} = 0.48\%$), параметры: $X1 = 0.42\%$, $X2 = 0.25\%$, $La1 = 7.7\mu H$, $La2 = 4.6\mu H$, $R_{вых} = 250$ кВт. Рассмотрено два варианта базовых частот: $f_{вых} = 1000; 2400$ Гц, при этом частота варьировалась на 1% в обе стороны. Нарушения норм зафиксированы в окрестности удвоенной частоты инвертора:

- для частот 990...1010 Гц, номера гармоник с нарушенными нормами 38, 39, 40, 42; максимальное нарушение отдельной гармоники – в 3.6 раза.
- для частот 2476...2424 Гц, номера гармоник с нарушенными нормами 94, 96, 97, 98; максимальное нарушение отдельной гармоники – в 3.8 раза.

Вывод. У всех ТПЧ старых поколений до 4-го нарушаются нормы искажения сети по отношению к последнему действующему стандарту ГОСТ 13109-97.

Генератор ТПЧ-5 пятого поколения имеет фильтр высших гармоник, и выдерживает все нормы по искажению сети – см. п.10.

10. Влияние генератора ТПЧ-5 пятого поколения на искажения напряжения сети проиллюстрировано на том же примере наихудшего случая в выборке, который рассмотрен в п.9 ($X1 = 2.1\%$, $X2 = 2.5\%$). На Рис.4 показаны формы фазного U_a и линейного U_{ab} напряжений в узле сети, куда подсоединяется кабель ТПЧ-5. На Рис.5 показаны нормы сплошной линией, а кружочками – относительные амплитуды гармоник фазного напряжения.

Все нормы соблюдены с запасом. Наименьший запас для 5-ой гармоники: амплитуда 4.1%, норма 6%. Среднеквадратичный коэффициент $KU=5.1\%$, норма 8%. Фильтр высших гармоник в звене постоянного тока проектируется таким образом, чтобы во всем диапазоне частот инвертора, предусмотренных для данного исполнения, выдерживать границу соблюдения норм по ГОСТ 13109-97, показанную на Рис.1 – кривая $X2_{min}=f1(X1)$.

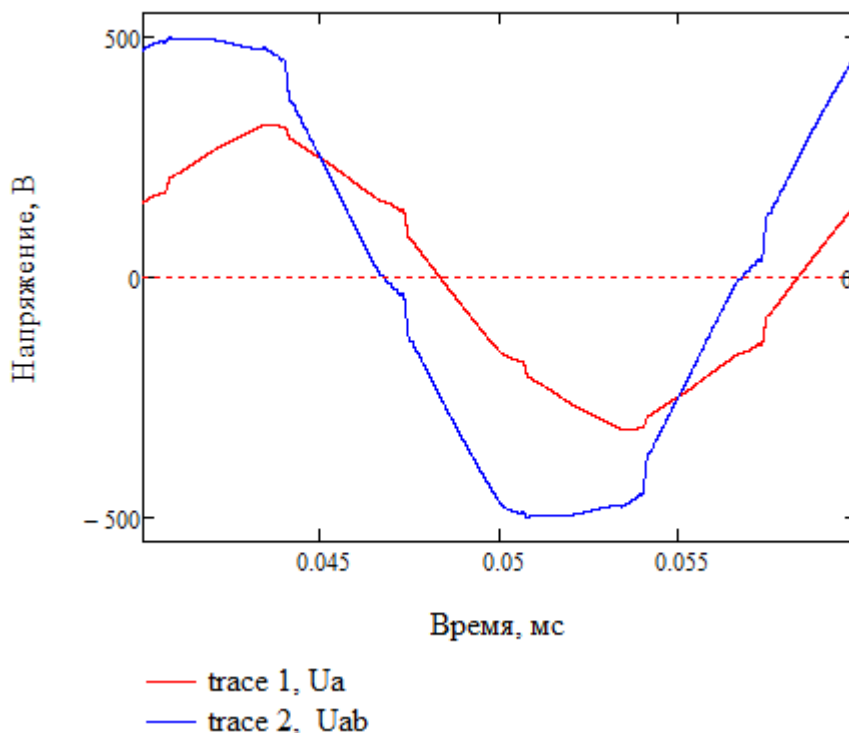


Рис.4. Расчетные осциллограммы фазного U_a и линейного U_{ab} напряжений в узле сети, куда подсоединяется кабель ТПЧ-5 пятого поколения

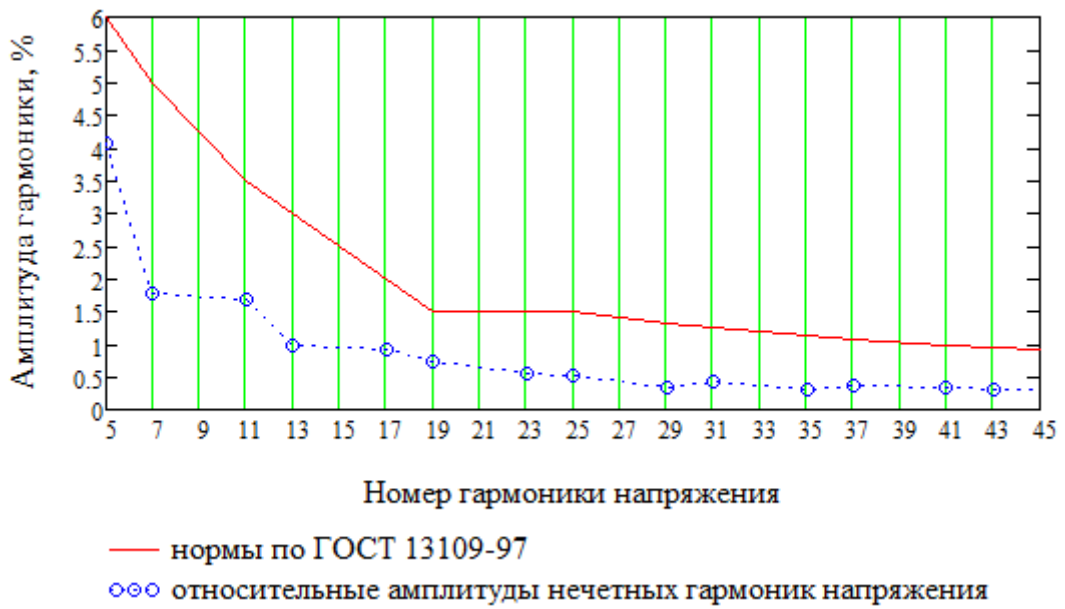


Рис.5. Относительные амплитуды гармоник фазного U_a напряжения, по отношению к первой гармонике, для ТПЧ-5 пятого поколения: а) нечетные; б) кратные трем; в) четные

11. Практические рекомендации по выбору входного кабеля для ТПЧ-5.

Сечение кабеля выбирается в зависимости от тока фазы:

$$I_a = 0.8 * I_d, \quad (10)$$

$$I_d = P_{\text{вых}} / U_d, \quad (11)$$

$$U_d = 1.3 * U_{ab}, \quad (12)$$

где

I_a – ток фазы сети, эфф.;

I_d – среднее значение тока на выходе выпрямителя;

U_d – ориентировочное среднее значение напряжения на выходе выпрямителя;

U_{ab} – линейное напряжение сети, эфф.

Для сети 3 х 380В при открытой прокладке одножильного кабеля сечение медной жилы для двух вариантов длины, 10м и 100м, из расчета активных потерь напряжения не более 4%, дано в Табл.2 (информация www.atlastpk.ru).

Расчетные параметры четырехжильных кабелей типа АПвПГ (АПвВГ) на 0,6/1 кВ (производство по ТУ 16.К71-277-98) даны в Табл.3. Расчетные параметры одножильного кабеля марки АПвП 6/10 кВ (производство по ТУ 16.К71-335-2004) даны в Табл.4.

Табл.2. Выбор сечения S жилы кабеля в зависимости от тока фазы I_a

I_d, A	125	160	250	320	400	500	640	800	1000
I_a, A	100	128	200	256	320	400	512	640	800
$S, \text{мм}^2$, длина 10м	16	25	50	70	95	150	240	300	400
$S, \text{мм}^2$, длина 100м	50	70	95	120	150	185	240	300	400

Табл.3. Расчетные значения параметров в зависимости от сечения жилы 4-х жильных кабелей марки АПвПГ (АПвВГ) 0,6/1 кВ

Сечение жилы $S, \text{мм}^2$	25	35	50	70	95	120	150	185	240
Толщина изоляции, мм	0.9	0.9	1.0	1.1	1.1	1.2	1.4	1.6	1.7
Наружный диаметр, мм	24	26	27	32	35	39	42	47	52
$R, \text{Ом/км}$ при 90°C	1.54	1.11	0.822	0.568	0.411	0.325	0.265	0.211	0.162
$L, \text{мГн/км}$	0.267	0.260	0.255	0.252	0.247	0.246	0.247	0.248	0.245
$x, \text{Ом/км}$	0.083	0.082	0.08	0.079	0.076	0.077	0.076	0.078	0.077

Табл.4. Расчетные значения параметров одножильного кабеля марки АПвП (АПвВ) 6/10 кВ

S жилы, мм^2	25	35	50	70	95	120	150	185	240	300	400	500
S экрана, мм^2	16	16	16	16	16	16	25	25	25	25	35	35
Наружный диаметр, мм	23	24	26	27	29	30	32	33	36	39	42	45
$R_{90}, \text{Ом/км}$	1,540	1,110	0,820	0,568	0,410	0,324	0,264	0,210	0,160	0,128	0,0997	0,0776
$R_{\text{эк}}, \text{Ом/км}$	1,550	1,120	0,825	0,570	0,414	0,332	0,276	0,222	0,173	0,141	0,118	0,0955
$x_{\text{тр}}, \text{Ом/км}$	0,163	0,156	0,149	0,141	0,136	0,131	0,119	0,117	0,112	0,110	0,104	0,100
$x_{\text{пл}}, \text{Ом/км}$	0,230	0,214	0,208	0,199	0,193	0,188	0,176	0,172	0,170	0,167	0,162	0,158

Примечания: R_{90} – активное сопротивление при 90°C;

$R_{\text{эк}}$ – активное сопротивление с учетом потерь в экране;

$x_{\text{тр}}$ – индуктивное сопротивление при прокладке треугольником;

$x_{\text{пл}}$ – индуктивное сопротивление при прокладке в плоскости;

Кабель ТПЧ-5 подсоединяется к узлу сети, куда могут подсоединяться другие электро-потребители. В узле сети должны выдерживаться нормы по искажению напряжения сети. Чем выше индуктивность кабеля L_a2 , тем ниже амплитуды напряжения высших гармоник в узле, т.к. коэффициент KL делителя высших гармоник снижается:

$$KL = La1 / (La1 + La2)$$

(13)

Активное сопротивление вызывает потерю напряжения в кабеле. Длина кабеля ограничивается только по активному сопротивлению. Максимальное ограничение по активному сопротивлению всегда перекрывает ограничение по индуктивному сопротивлению, т.е. последнее не существует.

Отсюда следующий вывод. Поскольку нет максимального ограничения для индуктивности $La2$ кабеля, и в то же время есть полезный эффект от увеличения $La2$ согласно (13), то должен быть выбран способ прокладки кабеля с наибольшей индуктивностью. Существуют три способа прокладки кабелей:

- 1) 4-х жильным кабелем (параметры в Табл.3);
- 2) одножильным кабелем при прокладке треугольником (параметры в Табл.4);
- 3) одножильным кабелем при прокладке в плоскости (параметры в Табл.4).

Согласно Табл.4, в 3-ем способе индуктивность кабеля выше, поэтому рекомендуется всегда использовать 3-ий способ прокладки.

12. Рассмотрим пример, где возьмем длину кабеля $Leng = 30$ м, $P_{вых} = 250$ кВт, $U_{ab} = 380$ В и вычислим все сопутствующие параметры, описанные выше и имеющие отношение к искажению напряжения сети:

$$U_d = 1.3 * U_{ab} = 500 \text{ В} \quad \text{— по формуле (12);}$$

$$I_d = P_{вых} / U_d = 500 \text{ А} \quad \text{— по формуле (11);}$$

$$I_a = 0.8 * I_d = 400 \text{ А} \quad \text{— по формуле (10);}$$

$$S = 185 \text{ мм}^2 \quad \text{— по Табл.2;}$$

$$R_{эк} = 0.222 \text{ Ом/км} \quad \text{— по Табл.4;}$$

$$x_{пл} = 0.172 \text{ Ом/км} \quad \text{— по Табл.4;}$$

$$Ra2 = R_{эк} * Leng / 1000 \text{ м} = 6.67 \text{ мОм;}$$

$$xa2 = x_{пл} * Leng / 1000 \text{ м} = 5.16 \text{ мОм;}$$

$$La2 = xa2 / \omega = 16.4 \text{ мкН}$$

$$Ra2/x_{a2} = 1.3;$$

$$U_a = U_{ab}/\sqrt{3} = 220 \text{ В;}$$

$$X2 = 100\% * P_{вых} * xa2 / (3 * U_a^2) = 0.89\% \quad \text{— по формуле (6).}$$

На основании $X2$ выбираем значение $X1$ по Рис.1 на границе допустимых искажений:

$$X1 < 2.5\% \quad \text{— по Рис.1;}$$

$$x_{a1} < X1 * 3 * U_a^2 / (100\% * P_{вых}) = 14.5 \text{ мОм;}$$

$$La1 < x_{a1} / \omega = 46.2 \text{ мкН}$$

$$Sk1 > 3 * U_a^2 / x_{a1} = 10.0 \text{ МВА} \quad \text{— по формуле (1).}$$

Активная мощность сети P_a составляет примерно 5% от реактивной мощности короткого замыкания $Sk1$ (смотрите п.4):

$$P_a > 0.05 * Sk1 \quad \text{— по пункту 4;}$$

$$P_a > 500 \text{ кВт.}$$

Если реактивная мощность $Sk1$ равна 10 МВА и более, или активная мощность сети P_a равна примерно 500 кВт и более, то нормы по искажению сети в узле, куда подсоединяется кабель, будут выполнены. Если сеть менее мощная, то для выполнения норм надо передвинуть точку подсоединения кабеля к другому узлу – «выше» по линии сети. Тогда индуктивность сети $La1$ будет ниже (числитель (13)) и одновременно индуктивность кабеля $La2$ будет выше (знаменатель (13)) за счет удлинения кабеля. В результате коэффициент KL делителя высших гармоник уменьшится и нормы будут выполнены.

13. Если индуктивность кабеля $La2$ недостаточная и нет возможности передвинуть подсоединение кабеля к узлу «выше» по линии сети, и в то же время к данному узлу подсоединены другие ответственные электропотребители, то Изготовитель ТПЧ-5 может изготовить трехфазный дроссель с добавочной индуктивностью $La2$ под заказ. Цена дросселя суммируется к цене генератора ТПЧ-5.