

УДК 621.31

**ВЛИЯНИЕ, УЧЁТ И ПОДАВЛЕНИЕ ГАРМОНИК В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ****Кузнецов Артем Викторович<sup>1</sup>**, студентe-mail: [sws1007@mail.ru](mailto:sws1007@mail.ru)**Жукова Лидия Евгеньевна<sup>1</sup>**, студентe-mail: [sws1007@mail.ru](mailto:sws1007@mail.ru)**Горелов Сергей Валерьевич<sup>1</sup>**, профессор кафедры «Электроэнергетические системы и электротехника»e-mail: [sws1007@mail.ru](mailto:sws1007@mail.ru)<sup>1</sup> Сибирский государственный университет водного транспорта, Новосибирск, Россия

**Аннотация.** В статье рассматриваются источники гармоник, их влияние на работу сети, методы измерения и нормирования, а также способы подавления. Современные электрические сети подвержены искажениям напряжения и тока из-за гармоник, вызванных нелинейными нагрузками. Гармоники ухудшают качество электроэнергии, увеличивают потери, вызывают перегрев оборудования и снижают надёжность.

**Ключевые слова:** источники гармоник, качество электрической энергии, искажения напряжения питания.

**INFLUENCE, ACCOUNTING AND SUPPRESSION OF HARMONICS IN ELECTRIC NETWORKS****Artem V. Kuznetsov<sup>1</sup>**, Studente-mail: [sws1007@mail.ru](mailto:sws1007@mail.ru)**Lidiya E. Zhukova<sup>1</sup>**, Studente-mail: [sws1007@mail.ru](mailto:sws1007@mail.ru)**Sergey V. Gorelov<sup>1</sup>**, Associate Professor of the Department of «Electric Power Systems and Electrical Engineering»e-mail: [sws1007@mail.ru](mailto:sws1007@mail.ru)<sup>1</sup> Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk, Russia

**Abstract.** The article discusses sources of harmonics, their impact on network operation, methods of measurement and standardization, and methods of suppression. Modern electrical networks are subject to voltage and current distortions due to harmonics caused by nonlinear loads. Harmonics degrade the quality of electricity, increase losses, cause equipment overheating, and reduce reliability.

**Keywords:** sources of harmonics, quality of electrical energy, distortion of supply voltage.

Динамика изменения нагрузки силовых потребителей на протяжении последних десятилетий указывает на возросшую роль применения потребителей с нелинейной характеристикой. Для этого созданы все предпосылки, а именно: удешевление производства полупроводников, внедрение автоматизированных систем по энергосбережению, в том числе за счёт широкого диапазона регулирования частоты вращения асинхронного электродвигателя. При строительстве судов применяются современные технологии, которые включают в себя нелинейные электрические нагрузки, а их количество будет неуклонно расти.

Следствием этого является появление совместно с положительными аспектами существенного искажения форм кривых напряжений.

Причём спектр высших гармонических составляющих напряжения представлен в основном 5, 7, 11 и 13 гармониками. Такой режим работы систем электроснабжения обостряет проблему электромагнитной совместимости технических средств [2, 4, 5].

Выделим наиболее значимые виды воздействия высших гармоник на судовую электроэнергетическую систему

- увеличение токов или напряжений отдельных гармоник вследствие появления в электрической сети параллельного и последовательного резонансов;
- появления дополнительных потерь мощности и энергии в электрических сетях, трансформаторах, электрических машинах;
- изменение режимов работы электрических машин;
- ускорение старения изоляции электрооборудования, кабельных линий и сокращения вследствие этого срока их службы;
- ухудшения качества работы систем релейной защиты, автоматики, телемеханики и связи.

Особую актуальность воздействию высших гармоник обеспечивает тот факт, что в данном случае система является автономной с ограниченной мощностью трехфазного короткого замыкания. В результате при определённых режимах работы электроприводов возникают предпосылки для возникновения вибрации рабочих механизмов.



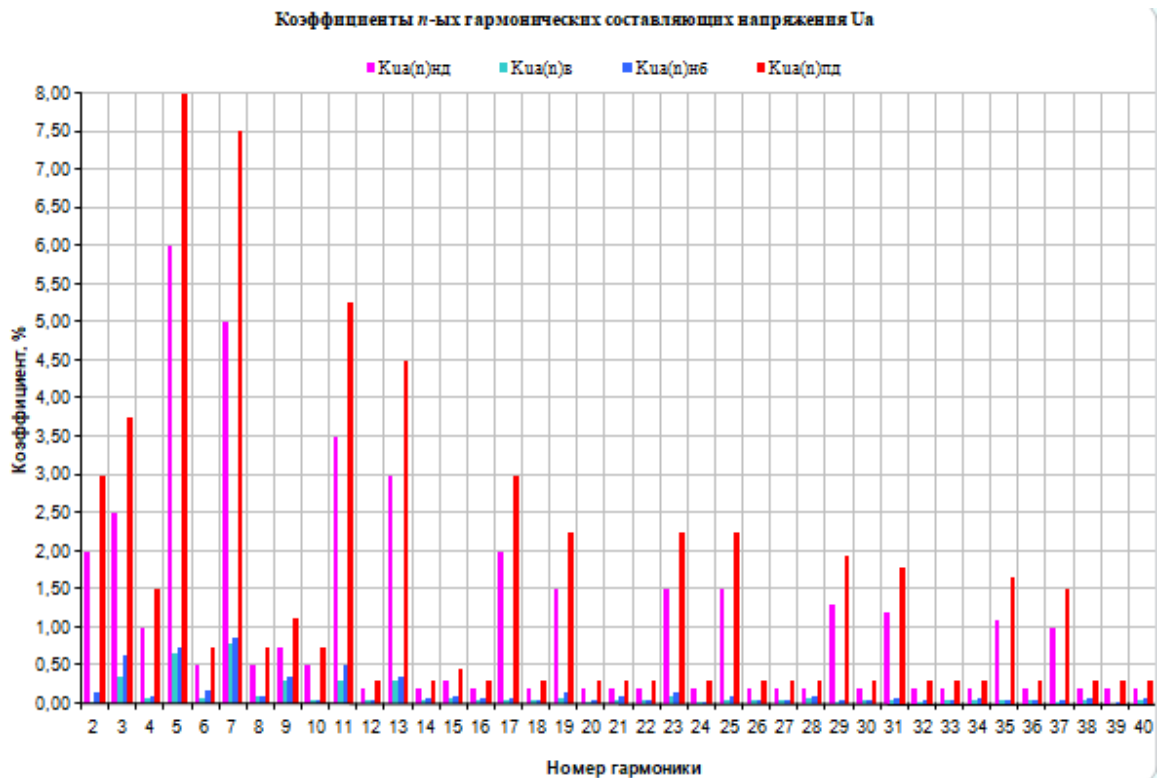


Рисунок 1 – Пример распределения высших гармонических составляющих питающего напряжения до 40 гармоники [6]

Наибольшее распространение в качестве приводного электродвигателя получил асинхронный электродвигатель. Для анализа консолидированного вибрационного воздействия рассмотрим влияние высших гармоник на создание вращающегося магнитного поля, возникновение сопутствующих высшим гармоникам потерь, вращающих и тормозящих моментов.

Каждая гармоника питающего напряжения создаёт в электродвигателе магнитное поле, вращающееся с частотой

$$n_{1k} = \frac{60f_k}{p} = \left(\frac{60f_1}{p}\right)k = kn_1, \quad (1)$$

где  $n_1$  – синхронная угловая скорость двигателя, обусловленная основной (первой) гармоникой);

$k$  – номер гармоники;

$p$  – число пар полюсов;  $f_1 = 50$  Гц;  $f_k = kf_1$

Исключение составляют третья гармоника и другие гармоники, кратные трём, которые создают пульсирующее поле.

Потери мощности. При работе асинхронного двигателя в условиях несинусоидального напряжения возникают добавочные потери, обусловленные высшими гармониками тока в цепях статора и ротора, так, например, при повышенных частотах в обмотках статора и ротора резко проявляется поверхностный эффект [7, 8].

Сопутствующие высшим гармоникам потери, при рассмотрении асинхронного электродвигателя определяются по формуле [1]

$$\Delta P_{\Delta, k} = \Delta P_{M, H} \sum_{i=2}^k K_{\Delta, k} \approx 0,2 \Delta P_{\text{ном}} \sum_{i=2}^k K_{\Delta, k}, \quad (2)$$

где  $\Delta P_{M, H}$  – номинальные потери мощности в меди статора, Вт;

$\Delta P_{\text{ном}}$  – суммарные номинальные потери электродвигателя, Вт;

$K_{\Delta, k}$  – коэффициент учитывающий возрастание потерь в меди за счёт  $k$ -й гармоники;

$k$  – номер последней учитываемой гармоники.

График функций  $K_{\partial, k} = f(k)$  представлен на рисунке 1.

Расчёт добавочных потерь по формуле (2) от действия на электродвигатель 5, 7, 11 и 13 гармоник показал, что  $\Delta P_{\text{А,Д}} \approx 0,04 \Delta P_{\text{ном}}$ . Величина этих потерь не может изменить тепловой режим работы асинхронного электродвигателя.

Магнитные потери в стали от высших гармоник невелики, так как амплитуды высших гармоник магнитного поля малы.

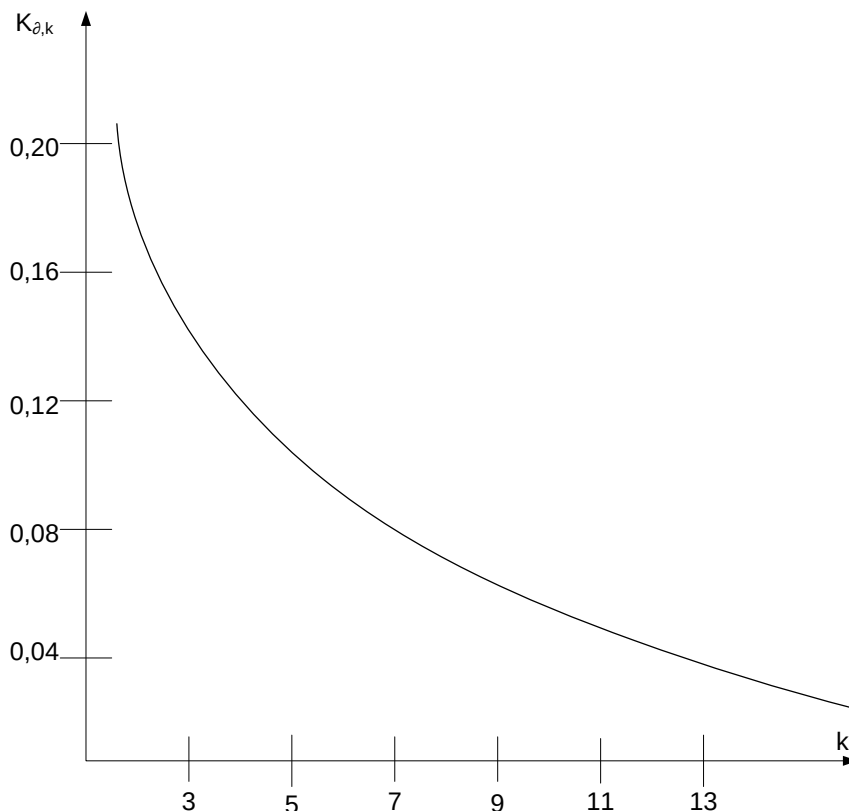


Рисунок 2 – График функции  $K_{\partial, k} = f(k)$  при кратности пускового тока

Консолидированное вибрационное воздействие гармонических составляющих имеет многофакторную природу. Так седьмая гармоника вращается в том же направлении, что и основная со скоростью

$$n_7 = 7n_1 \quad (3)$$

пятая в обратном направлении со скоростью

$$n_5 = 5n_1 \quad (4)$$

При неподвижном роторе седьмая гармоника образует момент  $M_7 > 0$ , действующий согласно с основным. По мере увеличения угловой скорости ротора скольжение по отношению к ротору уменьшается

$$S_7 = \frac{n_7 - n}{n_7} \quad (5)$$

и при  $n = n_7$ , когда  $S_7 = 6/7$ , обращается в нуль. При этом 7-я гармоника не перемещается относительно ротора, токи в нём не индуцируются и  $M_7 = 0$ . При дальнейшем увеличении угловой скорости ротора  $n > n_7$  (скольжение  $S_7 < 0$ ) по отношению к седьмой гармонике наступает генераторный режим и момент изменяет своё направление на противоположное, т.е.  $M_7 < 0$ .

Зависимость момента  $M_5$  от угловой скорости ротора имеет тот же характер. Однако, теперь скольжение

$$S_5 = \frac{n_5 - n}{n_5} \quad (6)$$

обращается в нуль при угловой скорости ротора  $n = -n_5$ , т.е. в области тормозного режима для основной гармоники, когда  $S_5 = 6/5 > 1$ .

гармонические составляющие магнитного поля статора образуют асинхронные моменты, и результирующий асинхронный электромагнитный момент находится в виде суммы.

Гармоники в электрических сетях оказывают воздействия совместно с другими показателями качества электрической энергии, поэтому необходимо рассматривать общую картину консолидированного воздействия снижения показателей качества электрической энергии, например гармонические составляющие, провал напряжения, несимметрия напряжения.

Так, например, при номинальном напряжении значение максимальной мощности превышает номинальную мощность практически вдвое. С уменьшением напряжения в питающей сети значение опрокидывающего момента (максимальной мощности) резко снижается (см. рисунок 3).

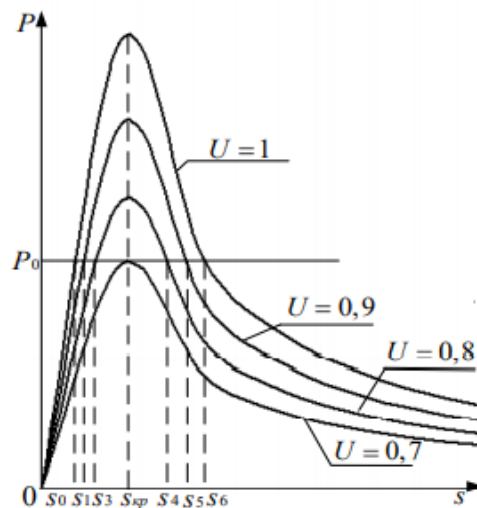


Рисунок 3 – Влияние снижения напряжения сети на полезную мощность асинхронного электродвигателя

Максимальный момент прямо пропорционален квадрату напряжения [1]

$$M_{max} = \frac{p \cdot m_1 \cdot U_1^2}{2 \cdot \omega_c \cdot C_1 \cdot (x_1 + C_1 \cdot x_2')}, \quad (7)$$

где  $p$  – число пар полюсов

$m_1$  – количество фаз питающего напряжения

$\omega_c$  – угловая скорость поля

$x_1$  – индуктивное сопротивление обмотки статора

$x_2'$  – приведённое индуктивное сопротивление обмотки ротора

$$C_1 = \frac{r_1 \cdot r_{12} + x_1 \cdot x_{12}}{r_{12}^2 + x_{12}^2} \quad (8)$$

В двигателях общего назначения  $C_1 \approx 1,02 \div 1,06$

При уменьшении напряжения потребляемая реактивная мощность нагрузки снижается. Однако при больших снижениях напряжения, реактивная мощность увеличивается из-за останова не отключившихся от сети асинхронных двигателей). При отключении двигателя

с заторможенным ротором, возникают значительные перенапряжения до 5Uф, так как при работе двигателя в его индуктивности рассеяния запасается магнитная энергия [2]

$$W_M = \frac{L_s}{2} * i_{cp}^2 \quad (9)$$

где  $L_s$  – индуктивность рассеяния двигателя;

$i_{cp}$  – ток среза.

Электромагнитная помеха (ЭМП) по провалу напряжения не только оказывает негативное воздействие, описанное ранее, но и может служить источником возникновения противоположной по воздействию на потребитель ЭМП по перенапряжению. Данное обстоятельство обостряет тот факт, что экипаж судна принципиально находится в условиях заведомо низкого уровня электробезопасности по сравнению с береговыми установками. Качка, повышенная влажность, металлические переборки со всех сторон и так далее все это требует дополнительной неуклонной проработки и повышения уровня электробезопасности. Поэтому возникновение подобного развития событий крайне негативно, а кроме этого, ремонт и замена судового электрооборудования обладает рядом индивидуальных особенностей, например сложность логистики, специальное исполнение узлов и механизмов, ограниченное пространство для проведения ремонта, большое количество сопутствующих работ и выполнения регламентирующих процедур. В сложившихся условиях в первую очередь проведён ретроспективный анализ и применения технических устройств и технических мероприятий в условиях берегового электроснабжения.

Гармоники напряжения вызывают в трансформаторах увеличение потерь на гистерезис, потерь, связанных с вихревыми токами в стали, и потерь в обмотках. Потери активной мощности, от токов высших гармоник

$$\Delta P_{Tk} = 3 \sum_{k=2}^{\infty} I_{Tk}^2 R K_{Tk}, \quad (10)$$

где  $I_{T,k}$  – ток  $k$ -й гармоники, протекающий через трансформатор, А;

$R$  – сопротивление короткого замыкания трансформатора на промышленной частоте, Ом;

$K_{T,k}$  – коэффициент, учитывающий увеличение сопротивления короткого замыкания для высших гармоник вследствие влияния поверхностного эффекта и эффекта близости.

Для силовых трансформаторов можно принять  $K_{T5} = 2,1$ ;  $K_{T7} = 2,5$ ;  $K_{T11} = 3,2$ ;  $K_{T13} = 3,7$ .

Важная составляющая воздействия гармоник на мощные трансформаторы состоит в циркуляции утроенного тока нулевой последовательности (гармоники кратные трём) в обмотках, соединённых в треугольник. Это может привести к их перегрузке. Поэтому в таких случаях необходимо принимать меры к снижению в сети гармоник, кратных трём.

Вентильные преобразователи, ведомые сетью, т.е. работа которых обуславливается питающей сетью переменного тока (выпрямители; инверторы, ведомые сетью; преобразователи частоты и т.д.), являются крупными потребителями реактивной мощности. Природа реактивной мощности этих преобразователей не связана с образованием магнитных полей.

Потребляемый из сети ток трехфазного мостового выпрямителя, как было показано, несинусоиден, а его первая гармоника сдвинута относительно синусоиды переменного напряжения сети. Наличие фазового сдвига свидетельствует о том, что выпрямитель потребляет из сети реактивную мощность. Потребление реактивной мощности и наличие в кривой тока высших гармоник приводят к увеличению действующего значения тока сети и росту потерь при передаче электроэнергии к выпрямительной установке.

Для обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) в электрической сети питания мощных вентильных преобразователей рекомендуется компенсацию высших гармоник тока осуществлять в точке присоединения. Потребность в выполнении этой





рекомендации особенно высока в электрических сетях 6 – 10 кВ с низкими интегральными показателями (незначительными мощностями при 3-фазных КЗ). С этой позиции СЭС предприятий нефтегазовой отрасли с мощными вентильными преобразователями буровых установок, систем транспортировки нефти и газа и т.д. представляется приоритетными для рассмотрения.

Во многих случаях источниками высших гармоник являются вентильные преобразователи. В связи с этим далее выполняется проектирование сети 10 кВ и выбор фильтрокомпенсирующего устройства для одного из преобразователей.

### **Вывод**

Амплитуды колебательных моментов не зависят от величины нагрузки на валу асинхронного электродвигателя, в то же время основной электромагнитный момент определяется статическим моментом на валу. Поэтому при небольшой нагрузке в режиме, близком к холостому ходу, амплитуда одного из колебательных моментов может превзойти величину основного электромагнитного момента двигателя. Это явление может вызвать неравномерность вращения ротора, особенно заметное при малых частотах вращения. Возникает вибрация электропривода.

Высшие гармонические напряжения вызывают:

- дополнительные потери в обмотках статора и ротора из-за действия вихревых токов и поверхностного эффекта. Ограничивает срок службы за счёт воздействия перегревов и вибрации электропривода.

- дополнительные потери электрической энергии и потери напряжения в линии электропередачи, что снижает уровень энергоэффективности и энергосбережения, а также требует дополнительного повышения проводимости линий электропередачи.

- увеличение потерь при трансформации электрической энергии, а именно потерь на гистерезис и потерь, связанных с действием вихревых токов в стали, а также сокращение срока эксплуатации трансформаторов, локальные перегревы бака трансформатора.

- перегрев и выход из строя конденсаторных батарей

- увеличение числа повреждений кабельных линий, за счёт повышенного воздействия на диэлектрик.

Учёт, влияние и подавление гармоник в электрических сетях необходимо рассматривать совместно с другими показателями качества электрической энергии, так как консолидированное влияние оказывает более существенное воздействие на все элементы электроэнергетической системы, в том числе за счёт межфакторного взаимодействия.

### **Список литературы:**

1. Копылов И.П. Электрические машины: Учебник для вузов.- М.: Энергоатомиздат, 1986. – 360 с.: ил.

2. Смыков Ю.Н. Системный подход к идентификации параметров электрических машин судовой электроэнергетической системы // В сборнике: Актуальные проблемы автоматизации и энергосбережения в ТЭК России. Материалы Всероссийского с международным участием научно-практического семинара. 2018. С. 174-177

3. Электромагнитная совместимость потребителей [Текст]: 345 моногр. / И.В. Жежеленко, А.К. Шидловский, Г.Г. Пивняк и др. — М.: Машиностроение, 2012. — 351 с.

4. Смыков Ю.Н. Проблемы электроснабжения судов технического флота от береговой электрической сети Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2015. № 3. С. 192-194.



5. Смыков Ю.Н., Сальников В.Г. Автоматизированный учет электроэнергии как критерий качественного функционирования электропередачи "берег - судно" В сборнике: Современные научные исследования: актуальные проблемы и тенденции. Сборник трудов Международной научно-практической конференции. 2014. С. 163-168.

6. ГОСТ 32144-2013. Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения (EN 50160:2010, NEQ). – М., Стандартинформ, 2014. – 16 с.

7. Гладких Т.Д. Подход к защите нефтепромысловых потребителей от провалов напряжения // В сборнике: инновационные инструменты повышения эффективности технологического развития топливно-энергетического комплекса. VI Всероссийский научно-практический семинар-конференция. Нижневартонск, 2021. С. 68-71

8. Смыков Ю.Н. Роль повышения качества функционирования электропередачи «берег-судно» при разработке планов управления энергоэффективностью судна В сборнике: Проблемы электроэнергетики и телекоммуникаций Севера России. Сборник трудов IV Международной научно-практической конференции. Москва, 2023. С. 138-145

