

Виноградов А. А., канд. техн. наук, проф.,
Зябкина О. Н., магистрант,
Михайлова М. Ю., ст. преп., аспирант

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г.Шухова

АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЛЕБЕДИНСКОГО ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНОГО КОМБИНАТА В БЕЛГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ

vinogradov@intbel.ru

Доля электроприемников с нелинейной нагрузкой постепенно возрастает, что приводит к появлению токи несинусоидальной формы в линиях электропередачи. По этой причине проблема качества электрической энергии в электрической системе актуальна на сегодняшний день.

Ключевые слова: показатели качества электрической энергии, Лебединский горно-обогатительный комбинат, нелинейная нагрузка, «Энергомонитор-3.3 Т1», суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения, коэффициенты несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательности, коэффициент n -й гармонической составляющей напряжения, отрицательное и положительное отклонение напряжения.

На сегодняшний день в системах электро-снабжения России становится все более актуальной проблема обеспечения качества электрической энергии. Это связано с быстро растущим числом нелинейных электроприемников, создающих в сетях при своей работе токи несинусоидальной формы [1]. Доля и мощность таких электроприемников постоянно возрастает как в промышленном производстве, так и в коммунально-бытовом секторе.

При этом в узлах нагрузки с индуктивными или емкостными сопротивлениями, при протекании несинусоидальных токов будут изменяться комплексные сопротивления, реактивные составляющие которых зависят от частоты как основной и высших гармонических составляющих (конденсаторные установки, трансформаторы и реакторы со своими индуктивностями рассеяния и пр. [2,3]). Вследствие этого потребители электрической энергии обладают одновременно нелинейными и частотными свойствами. Изучение комплексной электрической нагрузки представляет практический интерес, прежде всего для целей расчета и прогнозирования показателей качества напряжения, определения вклада отдельных потребителей в ухудшение электрической энергии.

В работе приведен анализ качества электроэнергии на Лебединском горно-обогатительном комбинате (ЛГОК) в Белгородской области, являющимся крупнейшим по добыче железной руды в России. Горнодобывающие предприятия относятся к 1-ой категории по условиям обеспечения надежности электро-снабжения. Основными поставщиками электроэнергии для Лебединского ГОКа являются Курская и Нововоронежская АЭС, которые в первую очередь и строились для электро-снабжения предприятий Курской магнитной анама-

лии (КМА): Михайловский ГОК, Лебединский ГОК, Стойленский ГОК, Оскольский электрометаллургический комбинат и др.

На всех объектах ЛГОКа присутствует большое количество электроприемников с нелинейной нагрузкой: электродуговые печи, электровозы, полупроводниковые преобразователи для регулирования частоты вращения асинхронных двигателей, импульсные источники питания, пускорегулирующая аппаратура для газоразрядных ламп освещения и множество других устройств, оказывающих влияние на показатели качества электрической энергии (ПКЭ) в системе электро-снабжения комбината.

Анализ показателей качества электрической энергии (ПКЭ) проводился на подстанциях комбината в течение 24 часов с интервалом времени 3 секунды в соответствии с требованиями ГОСТ Р 54149-2010 [5]. Замеры выполнялись прибором «Энергомонитор - 3.3Т1». Получены следующие результаты.

Номинальное напряжения на трансформаторных подстанциях ЛГОК: ГПП1, ГПП 3, ГПП 5, ГПП 8 – 6 кВ; ПС 123, ПС 137 – 10 кВ; ПС Лебеди, ПС Тяговая – 110 кВ.

Работа электроприемников комбината оказывает значительное влияние на следующие ПКЭ:

- коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения, K_U ;
- коэффициент n -й гармонической составляющей напряжения, $K_{U(n)}$;
- отрицательное и положительное отклонение напряжения, $\delta U_{(-)}$, $\delta U_{(+)}$;
- коэффициенты несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательности, K_{2U} , K_{0U} .

Гармонические составляющие напряжения обусловлены нелинейными нагрузками пользо-

вателей электрических сетей, различного напряжения. Гармонические токи, протекающие в электрических сетях, создают гармонические падения напряжений в полных сопротивлениях электрических сетей. Показателями КЭ, относящимися к гармоническим составляющим напряжения являются:

- коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения, K_U ;
- коэффициент n-й гармонической составляющей напряжения, $K_{U(n)}$;

Высшие гармоники вызывают:

- паразитные поля и электромагнитные моменты в синхронных и асинхронных двигателях, которые ухудшают механические характеристики и КПД машины. В результате необратимых физико-химических процессов, протекающих под воздействием полей высших гармоник, а также повышенного нагрева токоведущих частей наблюдается:
 - ускоренное старение изоляции электрических машин, трансформаторов, кабелей;
 - ухудшение коэффициента мощности ЭП;
 - ухудшение или нарушение работы устройств автоматики, телемеханики, компьютерной техники и других устройств с элементами электроники;
 - погрешности измерений индукционных счетчиков электроэнергии, которые приводят к неполному учету потребляемой электроэнергии;
 - нарушение работы самих вентильных преобразователей при высоком уровне высших гармонических составляющих.

Наличие высших гармоник неблагоприятно сказывается на работе не только электрооборудования потребителей, но и электронных устройствах в энергосистемах.

Для некоторых установок (система импульсно-фазового управления вентильными преобразователями, комплектные устройства автоматики и др.) допустимые значения отдельных гармоник тока (напряжения) указываются изготовителем в паспорте изделия.

Значение коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения K_{Ui} в процентах как результат i-го наблюдения вычисляем по формуле

$$K_{Ui} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_{(n)i}^2}}{U_{(1)i}}$$

где $U_{(n)i}$ - действующее значение напряжения n-ой гармоники, В, кВ.; $U_{(1)i}$ - действующее значение междуфазного (фазного) напряжения основной частоты для i-го наблюдения, В, кВ.

Значение коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения K_U в процентах как результат усреднения N наблюдений K_{Ui} на интервале времени, равном 3 с, вычисляют по формуле

$$K_U = \sqrt{\frac{\sum_{i=2}^N K_{Ui}^2}{N}}$$

где N - число наблюдений; i - текущий порядок наблюдения; n- текущее целое число, обозначающее порядок гармоники;

Значение коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения K_U не должно превышать в течение 95% времени значения установленного ГОСТом 54149-2010 (табл. 1) и в течение 100% времени значения (табл. 2).

Результаты измеренного K_U на подстанциях приведены на рис. 1.

Таблица 1

Значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения K_U , %, для напряжения электрической сети	
6-25 кВ	110-220 кВ
5	2

Таблица 2

Значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения K_U , %, для напряжения электрической сети	
6-25 кВ	110-220 кВ
8	3



Рис. 1. Значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения K_U , %

Превышение суммарного коэффициента гармонических составляющих межфазных напряжений U_{AB}, U_{BC} и U_{CA} более чем в полтора раза наблюдается на ГПП 5, на ПС 137 более чем в три раза. Превышение суммарного коэффициента гармонических составляющих $K_{U(BC)}$ межфазного напряжения U_{BC} зафиксировано на ПС Лебеди и составляет $K_{U(BC)}=25\%$, на ПС Тяговая - $K_{U(BC)}=20\%$

Коэффициент n -й гармонической составляющей напряжения, $K_{U(n)}$ в процентах как результат усреднения N наблюдений $K_{U(n)i}$ на интервале времени, равном $3s$, вычисляются по формуле

$$K_{U(n)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (K_{U(n)i})^2}{N}}$$

$$K_{U(n)i} = \frac{U_{(n)i}}{U_{(1)i}} * 100,$$

где $K_{U(n)i}$ - значение коэффициента n -ой гармонической составляющей напряжения в процентах как результат i -го наблюдения; $U_{(1)i}$ - действующее значение напряжения основной частоты на i -ом наблюдении в вольтах, киловольтах

Наибольший интерес представляют гармоники нечетного порядка с номерами 3, 5, 7, так как у них наблюдаются наибольшие амплитуды в спектре напряжений. В ГОСТе 54149-2010 регламентируются нормы КЭв течение 95%, табл. 3.

Таблица 3

Значение коэффициента n -ой гармонической составляющей, $K_{U(n)}$

Порядок гармонической составляющей n	Значение коэффициента n -ой гармонической составляющей $K_{U(n)}$, % для напряжения электрической сети	
	6-25 кВ	110-220 кВ
3	3	1,5
5	4	1,5
7	3	1

Предельно допустимое значение коэффициента n -ой гармонической составляющей для каждой гармоники в 1,5 раза больше нормально допустимого в течение 100% времени.

Сравнение коэффициентов гармонических составляющих $K_{U(n)}$ межфазных напряжений U_{AB}, U_{BC} и U_{CA} для гармоник 3, 5 и 7 со значениями $K_{U(n)}$, установленными ГОСТом 54149-2010 представлено на рис.2-4.



Рис. 2. Сравнение коэффициентов гармонических составляющих $K_{U(n)}$ межфазного напряжения U_{AB} для гармоник 3, 5 и 7 по ГОСТу 54149-2010

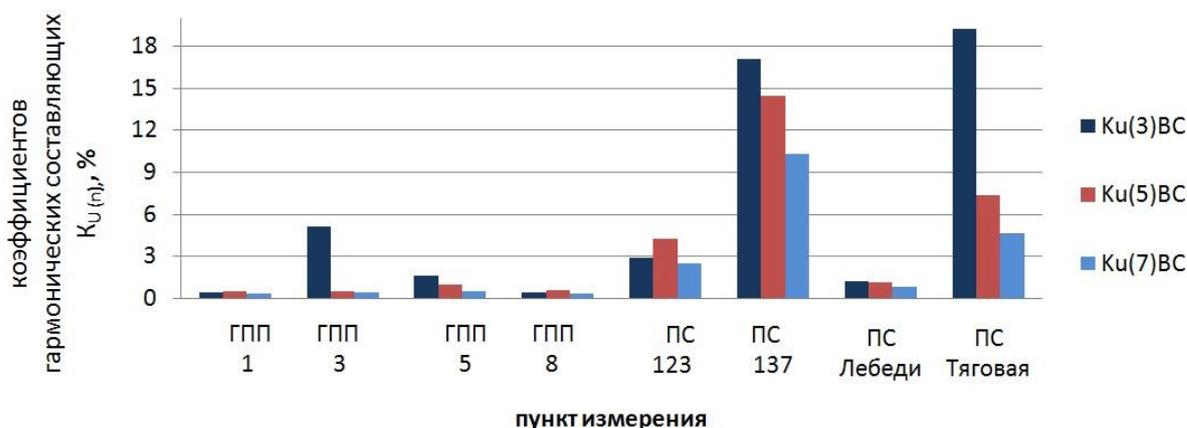


Рис. 3. Распределение коэффициентов гармонических составляющих $K_{U(n)}$ межфазного напряжения U_{BC} для гармоник 3, 5 и 7 по ГОСТу 54149-2010

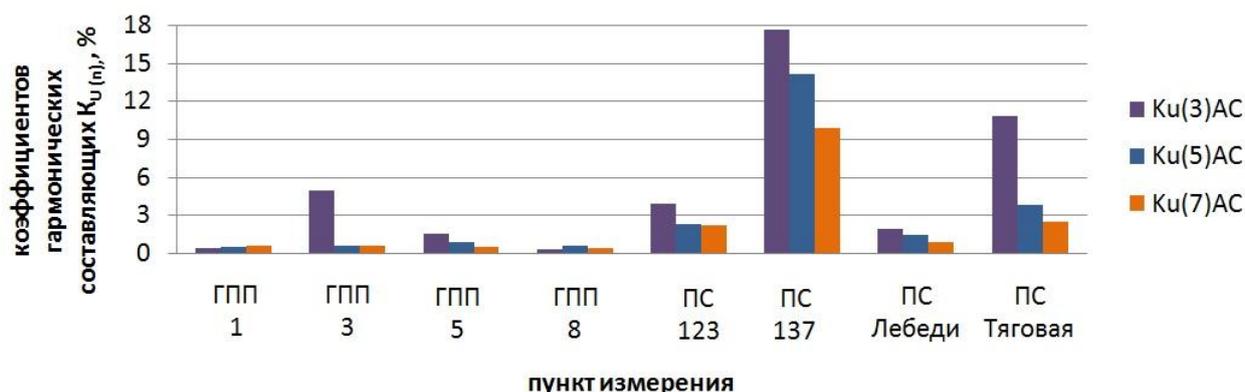


Рис. 4. Распределение коэффициентов гармонических составляющих $K_{U(n)}$ межфазного напряжения U_{AC} для гармоник 3, 5 и 7 по ГОСТу 54149-2010

Наиболее выраженная третья гармоника межфазных напряжений, превышает норму более чем в 3 раза на ПС 137, ПС 123 и в 2 раза ПС Тяговая; у пятой гармоники превышение составило более чем в 3 раза на ПС137, в два раз на ПС123 и ПС Тяговая; седьмая гармоника превышает норму в три раза на ПС 137, и более чем в 2 раза на ПС Тяговая, в остальных пунктах измерения $K_{U(n)}$ имеют допустимые значения.

Основные потребители, имеющие нелинейный характер -это тяговая подстанция железной дороги. Электрифицированная железная дорога переменного тока является специфическим потребителем электрической энергии. Помимо того, что электротяговая нагрузка является несимметричным нелинейным потребителем с переменной нагрузкой, имеет место существенное отличие от других потребителей, которое заключается в том, что железная дорога является протяженным приемником электрической энергии, и питание ее тяговых подстанций не может быть осуществлено от одного узла энергосистемы.

Оценка несимметрии напряжений выполнялось на основе расчетов коэффициента несимметрии напряжения по обратной и нулевой последовательности.

Коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} , %, как результат i -го наблюдения определялся по формуле:

$$K_{2U_i} = (U_{2(1)}/U_{1(1)}) * 100,$$

где $U_{2(1)}$ - действующее значение напряжения обратной последовательности основной частоты трехфазной системы напряжений в i -ом наблюдении, В, кВ; $U_{1(1)}$ - действующее значение напряжения прямой последовательности основ-

ной частоты в i -ом наблюдении, В, кВ.

Коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности K_{0U} , %, определялся по формуле:

$$K_{0U_i} = (\sqrt{3}U_{0(1)}/U_{1(1)}) * 100;$$

где $U_{0(1)}$ - действующее значение напряжения нулевой последовательности основной частоты трехфазной системы напряжений в i -ом наблюдении, В, кВ;

Для указанных показателей КЭ установлены следующие нормы:

- коэффициенты несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} и несимметрии напряжений по нулевой последовательности K_{0U} в точке передачи электрической энергии, усредненные в интервале времени 10 мин, не должны превышать 2% в течение 95 % времени интервала в одну неделю;

- значения коэффициентов несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} и несимметрии напряжений по нулевой последовательности K_{0U} в точке передачи электрической энергии, усредненные в интервале времени 10 мин, не должны превышать 4% в течение 100 % времени интервала в одну неделю.

Значения коэффициентов несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} и несимметрии напряжений по нулевой последовательности K_{0U} , между значениями, установленными ГОСТом 54149-2010 представлено на рис.5. Наибольшее значение коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности K_{2U} составляет 37 %, что в 9 раз превышает норму на ПС 137. K_{0U} по нулевой последовательности на этой же подстанции имеет меньшие значения 25%, что превышает норму в 6 раз.

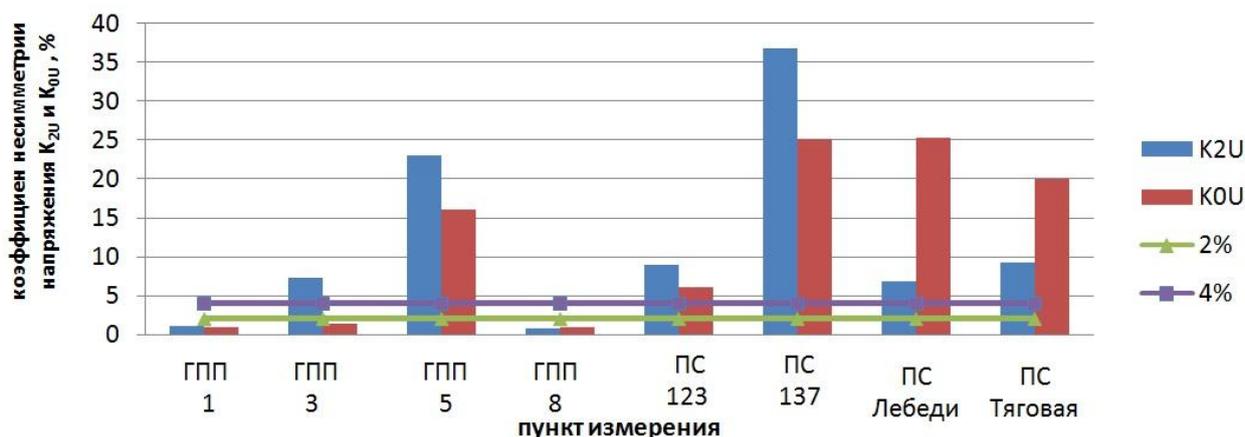


Рис. 5. Коэффициенты несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} и несимметрии напряжений по нулевой последовательности K_{0U}

Несимметрия напряжений происходит под воздействием неравномерного распределения нагрузок по фазам. Источниками несимметрии напряжений являются: дуговые сталеплавильные печи, тяговые подстанции переменного тока, электросварочные машины, однофазные электротермические установки и другие однофазные, двухфазные и несимметричные трёхфазные потребители электроэнергии.

Показателями КЭ, относящимися к медленным изменениям напряжения электропитания, являются отрицательное $\delta U_{(-)}$ и положительное $\delta U_{(+)}$ отклонения напряжения электропитания в точке передачи электрической энергии от номинального/согласованного значения, %:

$$\delta U_{(-)} = [(U_0 - U_{m(-)})/U_0]100;$$

$$\delta U_{(+)} = [(U_{m(+)} - U_0)/U_0]100 ,$$

где $U_{m(-)}$, $U_{m(+)}$ - значения напряжения электропитания, меньшие U_0 и большие U_0 соответственно, усредненные в интервале времени 10 мин в соответствии с требованиями ГОСТ Р 51317.4.30-2008; U_0 - напряжение, равное стандартному номинальному напряжению $U_{ном}$ или согласованному напряжению U_C . Положительные и отрицательные отклонения напряжения в точке передачи электрической энергии не должны превышать 10 % номинального или согласованного значения напряжения в течение 100 % времени интервала в одну неделю, и 5 % номинального или согласованного значения напряжения в течение 95 % времени.

Укажем отклонения напряжения $\delta U_{(-)}$ и $\delta U_{(+)}$, полученные за период измерений 24 часа, показывает рисунок 6.

Следует отметить, что отрицательное и положительное отклонения напряжения являются положительными величинами.



Рис. 6. Положительные и отрицательные отклонения напряжения

Отклонение напряжения явно выражено на ГПП5 и ПС137 и ПС Тяговая. Наибольшее значение зафиксировано на ПС 137, которое составляет +11%.

Обобщая результаты анализа показателей качества электроэнергии для Лебединского ГОКа, получаем следующее:

1. превышение суммарного коэффициента гармонических составляющих межфазных напряжений U_{AB}, U_{BC} и U_{CA} наблюдается на ГПП 5 более чем в полтора раза, на ПС 137 бо-

лее чем в три раза. Превышение суммарного коэффициента гармонических составляющих $K_{U(BC)}$ межфазного напряжения U_{BC} зафиксировано на ПС Лебедеи и составляет $K_{U(BC)}=25\%$, на ПС Тяговая - $K_{U(BC)}=20\%$;

2. наиболее выраженная третья гармоника межфазного напряжения, имеет превышение более чем в два раза на ПС 137, ПС 123 и ПС Тяговая; у пятой гармоники превышение составило более чем в два раза на ПС137, в два раза на ПС123 и ПС Тяговая; седьмая гармоника имеет превы-

шение в три раза на ПС 137, на остальных пунктах измерения имеет допустимые значения;

3. отрицательное и положительное отклонение напряжения в среднем составляет 6%, наибольшее значение 11%. Отклонения напряжения оказывают значительное влияние на работу асинхронных двигателей (АД), являющихся наиболее распространенными приемниками электроэнергии в промышленности

4. коэффициенты несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательности в следствии наличия на предприятии нелинейных потребителей в среднем составляет 15%, норма 4%. Наибольшее значение выявлено на ПС 137, где один из потребителей Тяговая ПС, и составляет 36%, что в 9 раз превышает норму, в результате неравномерного распределения нагрузок по фазам.

В ГОСТе указывается, что ответственность за нарушение норм по показателям коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности и коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности лежит на потребителях с несимметричной нагрузкой. Несимметрия напряжения значительно ухудшает режимы работы многофазных вентильных выпрямителей, конденсаторных установок, асинхронных двигателей, синхронных машин. Несимметрия напряжений значительно влияет и на однофазные ЭП, если фазные напряжения неравны, 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 фазе с меньшим напряжением. Несимметрия напряжений усложняет работу релейной защиты, ведет к ошибкам при работе счетчиков электроэнергии и т.д.

Резюмируя, отметим, что в системе электроснабжения Лебединского ГОКа, работающей на нагрузку с нелинейной характеристикой, возникают гармонические составляющие напряжения и тока, процентное содержание которых в ряде случаев превышает нормативные значения в несколько раз. Наибольший вклад в это явление вносят тяговые подстанции железнодорожных сетей комбината. Эти подстанции оказывают кондуктивное влияние на электрические сети и создают гармоники высшего порядка, которые могут вызвать перенапряжения в системе электроснабжения предприятия. Необходимо предусматривать устройства [4], снижающие гармонические составляющие напряжения и тока, такие как специальные фильтры и устройства подавления гармоник.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Боярская Н.П. Влияние гармонического состава токов и напряжений на эффективность энергосбережения / Н.П. Боярская, В.П. Догун: Вестник Красноярского государственного аграрного университета, 2010. - № 4. - С. 130-134
2. Харлов Н.Н. Параметрическая модель узла нагрузки с нелинейными электроприемниками / Н.Н. Харламов: Известия Томского политехнического университета, 2005. - Т. 308. - № 5. - С. 155-159
3. Виноградов А.А. Показатели качества электрической энергии, обусловленные применением светодиодных светильников / А.А. Виноградов, О.Н. Зябкина: Вестник БГТУ им. В.Г.Шухова, 2013 (в печати)
4. Виноградов А.А. Анализ потребления реактивной мощности в электрических сетях 0,4-10 кВ / А.А. Виноградов, М.Н. Нестеров // Светотехника и электроэнергетика. – 2007. - №3-4. – С.50-52.