

Р. К. Зарипов, Р. Х. Тукшаитов

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЯДА ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АНАЛИЗАТОРОВ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

R. K. Zaripov, R. H. Tukshaiov

Comparative Analysis of a Number of Technical Characteristics of Electric Power Analyzers

Проведен сравнительный анализ технических характеристик современных и ранее разработанных типов анализаторов. Основное внимание уделено достоверности приводимых верхних и нижних пределов измерения коэффициента нелинейных искажений напряжения электросети и входного тока нагрузок. Отмечено, что верхний предел измерения коэффициента нелинейных искажений напряжения электросети в современных анализаторах выбран завышенным в 10–20 раз. Обоснована целесообразность ограничения верхних пределов значений коэффициента нелинейных искажений напряжения электросети до 100%, а входного тока нагрузок – до 500 %.

Ключевые слова: анализатор, техническая характеристика, коэффициент нелинейных искажений, диапазон измерения, нагрузка, точка присоединения, электросеть

The authors performed technical characteristics comparative analysis of the state-of-the-art and developed earlier conventional types of analyzers. Primary attention was paid to the authenticity of upper and lower measurement limits of the grid voltage and input load current total harmonic distortion (THD) being adduced. It was noted that the THD upper limit had been selected 10-20 times overrated. The article substantiates the practicability for limiting the THD measuring upper limits values of electric power grid by 100% and input load current by 500%.

Key words: analyzer, technical characteristics, nonlinear distortion coefficient, measurement range, load, connection point, power grid

Анализаторы качества электроэнергии позволяют измерять большое количество электрических показателей и предназначены для контрольно-диагностических и исследовательских целей. Первоначально данный тип приборов выпускался для применения в энергетике. Однако в последние годы в связи с широким внедрением преобразователей электроэнергии AC-DC типа в силовой электронике они начинают применяться для определения коэффициента нелинейных искажений их входного тока, коэффициента мощности и мощности потребления, а также спектрального состава входного тока нагрузок, вплоть до 50-й гармоники промышленной частоты [1–3].

Для упрощения изложения материала такой прибор далее будем именовать вкратце “анализатором”. В настоящее время выпускается большое количество достаточно дорогих анализаторов, как современных, так и ранее разработанных типов и моделей (возможно даже их избыточное количество), что затрудняет их окончательный выбор, особенно на этапе приобретения. Поэтому представляет интерес сравнительный анализ характеристик различных типов анализаторов, которые, в определенной степени, отличаются по числу измеряемых показателей, диапазону их измерения, функциональным возможностям и стоимости. Обстоятельный сравнительный анализ технических характеристик (ТХ) анализаторов осуществить достаточно сложно, а в ряде случаев и невозможно, в силу неидентичности представления в них показателей.

Для обоснования необходимости применения в анализаторах соответствующих предельных значений

коэффициентов нелинейных искажений напряжения электросети (K_u) и коэффициентов нелинейных искажений входного тока нагрузок (K_I) необходимо иметь представление об их значениях, которые встречаются на практике [4–6]. В электросетях (ЭС) предприятий и организаций значения K_u находятся в пределах 1,5–3,0 %, а электросетях ЖКХ – на уровне 3–5 % [7, 8]. В энергосистемах нефтедобывающей отрасли и электроснабжения тягового электротранспорта они могут значительно превышать нормативные значения, достигая 20–30 % в силу широкого применения силовой преобразовательной техники [4, 5].

Что касается верхнего предела K_I , то при работе в номинальном режиме он составляет у трансформаторов и двигателей 2–5% [8–10], а у компьютеров, люминесцентных, газоразрядных и светодиодных светильников порядка 50–100 % [8]. У светодиодных ламп (СДЛ) K_I может достигать 120–200 % [9, 10]. Последнее обстоятельство обусловлено тем, что у СДЛ длительность импульса входного тока несколько меньше, из-за меньшей степени сглаживания напряжения на выходе драйвера.

Сложность осуществления систематизации ТХ анализаторов заключается в отсутствии единой формы их представления на сайтах разных производителей и их дилеров даже для одного и того же типа анализатора. Несмотря на это, предприняты усилия по их приближенному представлению в систематизированном виде и обсуждению характера такого их представления (табл. 1 и 2). При этом основное внимание уделено такому важному показателю качества электроэнергии, как коэффициент нелинейных

искажений, нормируемого в соответствии с ГОСТ 32144-2013 [11]. Поэтому в представленной статье решено провести сравнительный анализ электрических показателей, уделив при этом основное внимание одному из важных показателей качества электроэнергии – коэффициенту нелинейных искажений, обозначаемому в зарубежной литературе аббревиатурой *THD* (*Total Harmonic Distortion*).

Результаты системного и сравнительного анализа выпускаемых анализаторов

Верхние предельные значения коэффициента нелинейных искажений

Согласно данным табл. 1 в приборах, выпущенных 10–15 лет назад, верхний предел измерения K_U не превышал 25–30 %, а K_I – в основном 50 %. По значению верхнего предельного значения K_I можно сделать заключение, что ранее разработанные анализаторы, например “Прорыв” и “Ресурс”, предназначались для применения в энергетике с целью оценки значений K_U и K_I в точках присоединения нагрузок к ЭС среднего и высокого напряжения.

В точке присоединения электросети разных нагрузок по мощности потребления и уровню нелинейных искажений по напряжению K_U не превышает 25–30 % [3, 5] при нормативных требованиях к нему в низковольтных ЭС, равном 8% [11]. Очевидно, исходя из этого уровня, в ранних разработках, еще продолжаемых выпускаться промышленностью, верхний предел K_U выбран в основном равным 25 и 30%. Повышение верхнего его предела в те годы более 50% не представлялось целесообразным, так как более высокие значения в ЭС не допускались. При превышении K_U указанного значения в исключительных случаях вполне можно ограничиваться лишь соответствующим текстуальным указанием наблюдаемого явления.

С целью снижения уровня K_U в ЭС путем отключения отдельных нагрузок, имеющих наибольшее превышение K_I , возникла необходимость их выявления. Для этого в последующих разрабатываемых моделях анализаторов предусмотрели повышение верхнего предела измерения K_I с 25–30 до 100%. Одновременно было осуществлено повышение верхнего предела K_U до 100%, что было сделано тогда не совсем обоснованным.

Результаты систематизации показателей ТХ современных анализаторов представлены в табл. 2. В них предельные значения K_I и K_U без научного обоснования были увеличены сразу в 10–20 раз, а именно до 1000%. К сожалению, два современных разработчика анализаторов не приводят в ТХ значения K_U и K_I , но отмечают, что они вычисляются. Между тем остается неясным вычисляет сам анализатор или это приходится осуществлять самому пользователю.

Как отмечено выше, среди многих нелинейных нагрузок наибольшие значения K_I имеют СДЛ (120–200 %) [9, 10], поскольку на их входе отсутствуют корректоры коэффициента мощности. Среди многочисленных сообщений лишь в одной работе, посвященной изучению преобразователей тяговых ЭС Сибирской железной дороги, зафиксировано на коротком интервале времени максимальное значение K_I , равное 325 % [4]. Согласно результатам компьютерного моделирования [12], коэффициент K_I гипотетически может принять и значение, равное 1000 % только в том случае, если длительность импульса входного тока нагрузки будет не более 0,04 мс, что в 250 раз меньше длительности полупериода тока промышленной частот (10 мс). Остается непонятным, почему в ТХ двух анализаторов из восьми такой высокоинформативный показатель качества электроэнергии сведения о коэффициентах K_U и K_I вообще отсутствуют.

Таблица 1. Сравнение технических характеристик ранее разработанных и выпускаемых анализаторов качества электрической энергии

Марка и модель Параметр	Прорыв Т-А-КТ250	Ресурс UF2M-3T52	Энергомонитор 3.3T1	АКИП АКЭ-2100
Верхний оценочный предел измерения мощности, МВт	1,2	1,0	4	5
Диапазон измерения напряжения, В	2,0–340	2,3–340* (0,5–570)	1–360* (1–415)	1–1000
Диапазон измерения тока, А	0,1–3000* (0,05–3000)	0,01–3600* (0,05–3000)	0,005–4500* (0,1–5000)	0–5000
Регистрация THDI, %	0–25	0,2–50* (0,5–100)	0–49,9	0–100
Регистрация THDU, %	0–25	0,1–30* (0,5–30)	0–49,9	0–100
Количество регистрируемых гармоник	50	40	40	50
Частота электросети, Гц	42,5–57,5	42,5–57,5* (45–55)	45–70* (45–75)	42,5–57,5* (50/60)
Масса, кг	0,40	4,0	2,0	1,6
Габариты, мм	183 × 109 × 35	280 × 245 × 125	250 × 120 × 80	270 × 19 × 66
Стоимость, тыс. руб.	107–165	180	186–240	195

* – сведения по данным разных сайтов

Таблица 2. Сравнение основных технических характеристик современных анализаторов качества электрической энергии

Марка и модель Параметр	HT Italia SC60R	АКИП АКЭ-824	Fluke 738	Chauvin C.A 8436
Верхний оценочный предел измерения мощности, МВт	9,9999	9,999	6,0	10
Диапазон измерения напряжения, В	15–460	2–1000	0,1–1000* (85–550)	10–1000
Диапазон измерения тока, А	0,3–3000	1,5–3000	0,001–1800* (0,001–6000)	0,005–6500* (0,1–6500)
Регистрация THDI, %	—	—	0,1–1000	0–1000
Регистрация THDU, %	—	—	0,1–1000	0–1000
Количество регистрируемых гармоник	49	49	50	50
Частота электросети, Гц	47–63,6	45–70* (42,5–69)	42,5–69* (42,5–57,5)	40–69* (42,5–57,5)
Масса, кг	1,2	1,0	1,1	3,7
Габариты, мм	225 × 165 × 75	235 × 165 × 75	198 × 167 × 55	270 × 250 × 180
Стоимость, тыс. руб.	180	451	310	190

* — сведения по данным разных сайтов

Поскольку значение K_U в ЭС согласно [3, 5] не превышает 50%, то выбранный в последующем его верхний предел измерения является в десятки раз завышенным. Технически этот предел легко реализуем в анализаторах в силу расширения возможностей современных микропроцессоров. Однако, это не может быть основанием для значительного завышения верхних пределов K_U и K_I . Вероятно это решение можно отнести к маркетинговому приему фирм разработчиков. Из представленных данных в табл. 1 и 2 и приводимого материала следует также, что по абсолютному значению K_U во многих случаях значительно меньше значения K_I . Исходя из изложенного, верхний предел измерения K_U в анализаторах вполне может быть ограничен 100%, а K_I — 500 %. В исключительных случаях, если показания анализатора все-таки превысят рекомендуемые пределы показателей, вполне можно в тексте ограничиться соответствующим указанием, а при необходимости можно вычислить K_I на основе разложения длительности импульса тока нагрузки в ряд Фурье. Значительное завышение верхних пределов измерения в анализаторах отмеченных показателей могут лишь вызывать у исследователей дополнительные излишние вопросы.

Нижние предельные значения коэффициента нелинейных искажений и погрешности их измерения

Сведения о погрешности измерения небольших значений коэффициентов, особенно при малых мощностях нагрузок, по существу отсутствуют в ТХ анализаторов, поскольку их начальные значения ряд производителей приводят, равными нулю (табл. 2). Лишь в ТХ анализаторов Flux-1738 это значение приводится, равным 0,1 %, а у “Ресурса” — 0,2 %. Для обеспечения измерения таких малых значений K_I и K_U необходимо иметь поверочный генератор напряжения, имеющий уровень нелинейных искажений в 3–5 раз меньше минимального измеряемого значения показателей. Между тем, на сегодня

в мире существует лишь несколько генераторов напряжения типа АКИП, обладающих погрешностью измерения на уровне $\pm 0,5\%$ и выходной мощностью, не превышающей 500 и 2000 Вт. Поэтому осуществить не только поверку, но и достоверное измерение значений K_I и K_U менее 1,0–1,5 % практически не только сложно, а во многих случаях и невозможно.

При проведении измерений K_U нагрузок, питаемых напряжением непосредственно от электросети, минимально регистрируемое его значение ограничено уровнем несинусоидальности напряжения электросети, минимальные значения которого порядка 1,5–2,0%. Следовательно, минимальное измеряемое значение при питании нагрузки от ЭС не может быть менее 1,5–2,0%. При этом будет сказываться погрешность измерения и самого прибора, которая будет тем больше, чем меньше измеряемое значение K_U нагрузки и потребляемая мощность. Отсюда следует, что в ТХ анализаторов неправомерно приводить минимальные значения как для K_U , так и K_I , равными нулю или 0,1%.

Исходя из вышеизложенного, единственным приемлемым способом снижения погрешности измерения на сегодня может быть внесение с определенным сопряжением поправок в результаты измерения K_I на уровень искажения напряжения ЭС.

Максимальный и минимальный пределы мощности, измеряемой анализаторами

Мощность нагрузки — более информативный показатель, чем сила тока и напряжение питания. Поэтому, приступая к ознакомлению с ТХ анализаторов, пользователь сразу задается вопросом — а в каких пределах они позволяют измерять мощность нагрузок при погрешности измерения силы тока и напряжения всего 0,1–1,0%. К сожалению, однозначных ответов на этот вопрос получить невозможно. Лишь в двух анализаторах (АКЭ-824 и АКИП-2100) из восьми приводятся значения нижних пределов мощности, равные соот-

ветственно 0,1 Вт и 0,1 кВт. Для этих целей казалось бы возможным просто воспользоваться предельными значениями тока и напряжения, приводимыми в табл. 1 и 2. Однако на их основе можно получить лишь оценочные верхние и нижние предельные значения измеряемой мощности. В действительности измеренные значения этих пределов будут иные. Например, умножая значения нижних пределов измерения для силы тока и напряжения, приведенные в ТХ анализатора АКЭ-824, получим завышенное значение минимальной регистрируемой мощности более, чем на порядок. Более однозначные нижний и верхние пределы мощности можно получить, если осуществлять привязку этих измерений к конкретному сетевому напряжению ЭС, например к 230 В.

Если судить по оценочным значениям верхнего предела измерения мощности, то в современных анализаторах верхний предел измеряемой мощности увеличен приблизительно в 2–3 раза относительно такового для ранее разработанных. Следует обратить внимание на завышенную точность представления верхних пределов мощности. Так в некоторых ТХ (табл. 2) они представлены четырехзначными и пятизначными числами, например в анализаторе GSC60R в виде 9,9999 МВт. Этот показатель представлен с погрешностью $\pm 0,0001\%$, в то же время он измерен с погрешностью на три порядка большей ($\pm 1\%$).

Под нижним предельным значением мощности следует понимать такое минимальное ее значение, при котором оно регистрируется с удовлетворительной погрешностью, например с погрешностью не менее $\pm 5\%$ и также при нормативном значении напряжения ЭС. Такие данные целесообразно в дальнейшем приводить в ТХ. В светотехнической практике приходится иметь дело с нагрузками очень малой мощности, начиная с 3–5 Вт и при уровнях K_f в пределах до 200%. Из всего изложенного вытекает, что для решения тех или иных задач исследователю следует пока самому подобрать требуемый тип анализатора.

Частота напряжения питания анализаторов и точность ее представления

В табл. 1 представлены показатели частоты напряжения питания ранее разработанных отечественных анализаторов. Питание их осуществляется обычно напряжением с частотой 50 Гц. При этом допускается отклонение частоты в пределах от 42,5 до 57,5 Гц. Такие величины отклонения частоты напряжения питания свидетельствуют о том, что анализаторы позволяют проводить исследования при питании нагрузок также от автономных источников электроэнергии, обладающих меньшей стабильностью частоты напряжения питания.

В последующих разработках, как в отечественных, так и зарубежных анализаторов, предусмотрена возможность их работы уже при частоте напряжения электросети, равной как 50 Гц, так и 60 Гц. Вычисления показывают, что допустимые значения отклонения

частоты напряжения составляют порядка $\pm 10\text{--}15\%$. Поэтому приводить значения этого показателя в ТХ с точностью на два порядка выше ($\pm 0,2\%$) представляется нецелесообразным. Вполне достаточно представлять ее предельные значения двузначными числами, например, в виде 43–69 Гц.

Выводы и рекомендации

1. Для ускорения ознакомления специалистов с техническими характеристиками анализаторов и правильной их интерпретации фирмам-разработчикам в технической документации целесообразно приводить сведения в унифицированном виде.

2. Во вновь разрабатываемых анализаторах верхний предел измерения коэффициента нелинейных искажений напряжения электросети целесообразно устанавливать равным 100%, а для входного тока нагрузок — 500 %.

3. При проведении измерений минимальных значений коэффициента нелинейных искажений тока нагрузок следует вносить поправку на уровень нелинейных искажений напряжения электросети.

4. В технических характеристиках анализаторов следует приводить также минимальные измеряемые значения коэффициента нелинейных искажений, мощности, напряжения и силы тока. При этом под минимально измеряемой величиной показателей следует понимать те ее значения, которые регистрируются с погрешностью не более $\pm 5\%$.

Литература

1. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий // 5-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоиздат, 2004. 358 с.
2. Карташев И. И., Тульский В. Н., Шамонов Р. Г. и др. Управление качеством электроэнергии. Уч. пос. Под ред. Ю. В. Шарова, 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Издательский дом МЭИ, 2019. 347 с.
3. Боярская Н. П., Довгун В. П., Егоров Д. Э. и др. Синтез фильтров компенсирующих устройств для систем электроснабжения: коллективная монография под ред. В.П. Довгуна — Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2014. 192 с.
4. Смирнов С. С. Свойства активных мощностей гармоник искажающих нагрузок. — Электротехника. 2010. № 9. С. 45–49.
5. Зырянов В. М., Митрофанов Н. А., Соколовский Ю. Б. Исследование гармонического состава напряжения преобразователя частоты. — Вестник ИГЭУ. 2015. Вып. 1. С. 1–7.
6. Коверникова Л. И., Суднова В. В., Шамонов Р. Г. и др. Качество электрической энергии: современное состояние, проблемы и предложения по их решению отв. ред. Н.И. Воропай. — Новосибирск: Наука, 2017. 219 с.
7. Тукшаитов Р. Х., Нигматуллин Р. М., Айхайти Исыхакефу, Салимуллин М. Ф. Оценка качества электрической энергии по уровню коэффициента искажения напряжения электросети. — Успехи современной науки. 2016. № 10. Т. 2. С. 105–107.
8. Тукшаитов Р. Х., Семенова О. Д. О характере зависимости коэффициента мощности и нелинейных искажений тока от уровня потребляемой мощности трансформаторами. В сборнике Интеграция науки и образования в вузах нефтегазового про-

- филя - 2022. Передовые технологии и современные тенденции: материалы Международной научно-практической конференции. — Уфа. УНПЦ «Издательство УГНТУ», 2022. С.359–363.
9. *Тукишаитов Р. Х., Шириев Р. Р.* Определение уровня нелинейных искажений входного тока разных типов нагрузок на основе измерения коэффициента мощности и его сомножителя $\cos \varphi$. — Практическая силовая электроника. 2018. № 4 (72). С. 30–36.
10. *Тукишаитов Р. Х., Зарипов Р. К.* Об одном эффективном способе снижения уровня эмиссии светодиодными лампами в электросеть высших гармоник промышленной частоты. — ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределение. 2023. № 1 (76). С. 70–74.
11. ГОСТ 32144-2013. Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Москва, 2013.
12. *Тукишаитов Р. Х., Семенова О. Д., Новокрещенов В. В.* Оценка уровня нелинейных искажений электроустановок на основе

моделирования длительности импульса их входного тока. — ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределение. 2022. № 3 (72). С. 54–58.

Зарипов Рустем Котдусович, аспирант кафедры «Электрооборудование и электрохозяйства предприятий, организаций и учреждений» Казанского государственного энергетического университета, тел. +7(987) 276-98-88, e-mail: zrust@mail.ru;

Тукшаитов Рафаил Хасьянович, д. б. н, Заслуженный профессор КГЭУ, профессор кафедры «Электрооборудование и электрохозяйства предприятий, организаций и учреждений» Казанского государственного энергетического университета, академик РАЕ. тел.: +7(987) 184-03-15; e-mail: trh_08@mail.ru.