

Анализ результатов одного компьютерного моделирования системы ПЧ-АД и уровня эмиссии ИМ ВЫСШИХ ГАРМОНИК В ЭЛЕКТРОСЕТЬ

В статье представлен анализ результатов одного компьютерного моделирования системы ПЧ-АД. На данном примере показана важная роль правильной постановки задачи и выбора исходных условий эксперимента для обеспечения достоверности получаемых результатов.

Рафаил Тукшаитов

trh_08@mail.ru

Александр Сидоров

asidorvini@rambler.ru

Широкое применение преобразователей частоты напряжения, например в нефтедобывающей промышленности и электротранспорте, нередко ведет к искажению синусоидальности напряжения электросети при превышении предельно допустимых его значений [1, 2], что в свою очередь становится причиной сокращения срока службы электрооборудования предприятий и выхода из строя разных измерительных и телекоммуникационных устройств [3–5].

Недавно опубликованная статья [6] также посвящена анализу уровня искажения синусоидальности напряжения электросети и входного тока преобразователя частоты путем компьютерного моделирования режима работы преобразователя, поскольку проблема снижения уровня высших гармоник, вносимых в электросеть, остается актуальной.

При первом просмотре отмеченная работа привлекла внимание наличием в спектральном составе входного

тока используемой модели, прежде всего постоянной составляющей в несколько десятков процентов, тогда как в устройствах даже с выраженной нелинейной характеристикой ее величина составляет 1–2%, а в электросетях она не превышает 0,1%, а также наличием повышенного уровня высших гармоник [1–3].

Автор осуществляет моделирование работы системы «преобразователь частоты — асинхронный двигатель» (ПЧ-АД) для трехфазного напряжения питания. Результаты исследования спектрального состава входного тока устройства и напряжения электросети представлены в двух таблицах (табл. 1 и 2) и на рис. 1 и 2. В этих таблицах и рисунках приведены значения составляющих спектров по 20-ю гармонику как для нечетных гармоник, так и для четных, а также постоянные составляющие достаточно значительной величины (до 70%). Для вычисления коэффициента нелинейных искажений напряжения сети THD_U приведена типовая формула,

Таблица 1. Спектральный состав тока [6]

Параметр	Номер гармоники					
	3	5	7	9	11	13
Значение гармонической составляющей согласно ГОСТ 30804.3.12–2013, %	24	13	8	5	4	3
Значение гармонической составляющей в системе ПЧ-АД без фильтра, %	16	13	5	2,4	3,3	2,2
Значение гармонической составляющей в системе ПЧ-АД с фильтром, %	10	8	4	2,1	1,8	1,6

Таблица 2. Спектральный состав напряжения [6]

Параметр	Номер гармоники					
	3	5	7	9	11	13
Значение гармонической составляющей согласно ГОСТ 13109–97, %	10	6	5	4	3,5	3
Значение гармонической составляющей в системе ПЧ-АД без фильтра, %	13	15	6	5,8	4,1	3,8
Значение гармонической составляющей в системе ПЧ-АД с фильтром, %	15	7,8	5,7	4,9	3,7	2,8

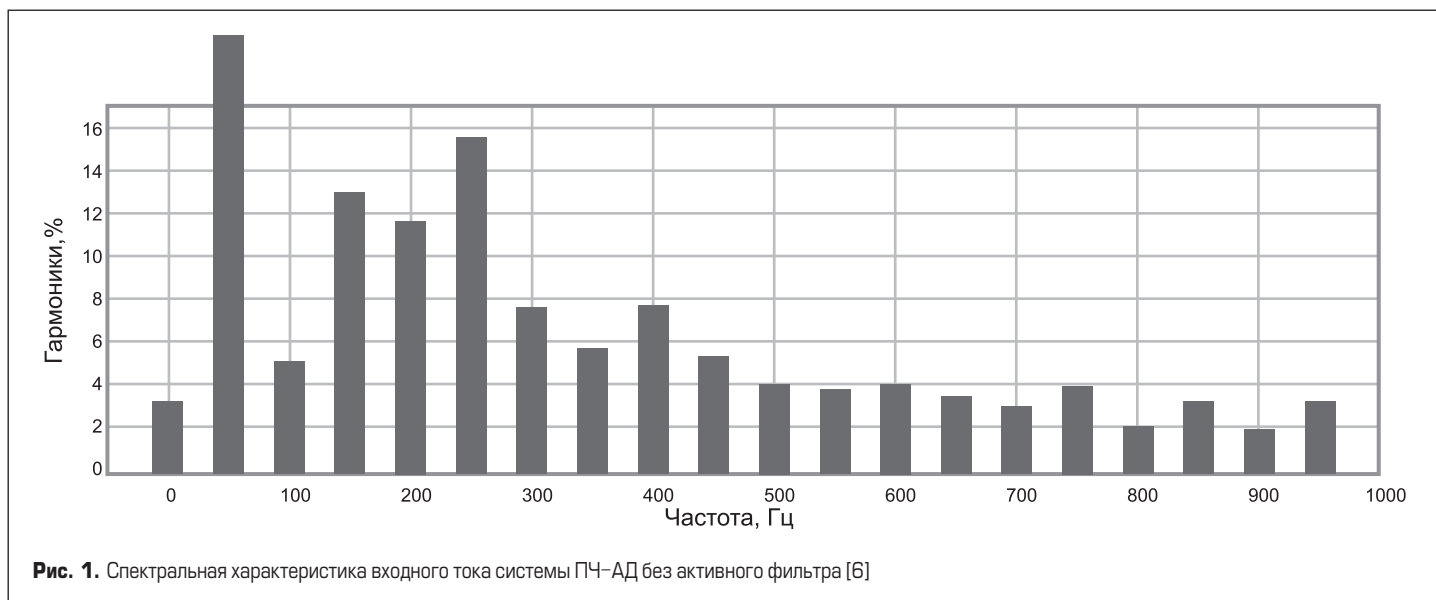


Рис. 1. Спектральная характеристика входного тока системы ПЧ-АД без активного фильтра [6]

построенная на основе учета 40 составляющих спектрального состава исследуемых показателей. Для снижения уровня высших гармоник применен активный фильтр и рассмотрена его эффективность. Сделано краткое заключение по работе.

По мере дальнейшего ознакомления со статьей возник ряд вопросов следующего содержания: почему в таблицах 1 и 2 в отличие от графиков (рис. 1 и 2) отсутствуют четные гармоники и постоянные составляющие; почему амплитуды четных гармоник большой величины соизмеримы с амплитудами нечетных гармоник и выходят за рамки существующих представлений; почему в спектре напряжения электросети содержится постоянная составляющая ряда Фурье значительной величины и какова ее природа; на основе какого количества гармоник определялись в действительности значения THD — на основе первых нечетных шести гармоник, или на основе всех 13 или 20 гармоник, представленных на рис. 1 и 2, или же даже 40 гармоник в соответствии с требованиями ГОСТ 32144-2013? Возникшие

вопросы побудили провести более детальный анализ содержания статьи.

Прежде всего, хочется отметить, что частотный электропривод с преобразователем частоты применяется достаточно широко в промышленности для повышения энергоэффективности работы электрооборудования. Использование электродвигателей для электродвижения судов действительно является актуальным, однако сама цель и задачи работы остаются нераскрытыми.

Представляло интерес выяснить, на основе какого действительного количества гар-

моник в статье приведено значение коэффициента нелинейных искажений, прежде всего по току THD_I , равное 28,97. Хотя количественные сведения о величине коэффициента искажения по напряжению THD_U в работе отсутствуют, он также остается в ней предметом обсуждения. Поэтому были проведены вычисления обоих коэффициентов на основе учета разного количества гармоник с использованием данных в таблицах 1 и 2 с использованием данных рис. 1 и 2. Результаты вычислений обобщенно представлены в таблице 3.

Таблица 3. Значения коэффициента нелинейных искажений THD на основе учета разного количества гармоник

Варианты формы сигнала	По напряжению		По току	
	Без фильтра	С активным фильтром	Без фильтра	С активным фильтром
Симметричная (при учете только первых шести нечетных гармоник)	21	13	21	14
Асимметричная (при учете 13 гармоник)	29	31	26	24
Асимметричная (при учете всех 20 гармоник)	30 (31,2)	36 (35,8)	28 (28,90)	24 (25,9)

Примечание. В скобках приведены значения из работы [6].

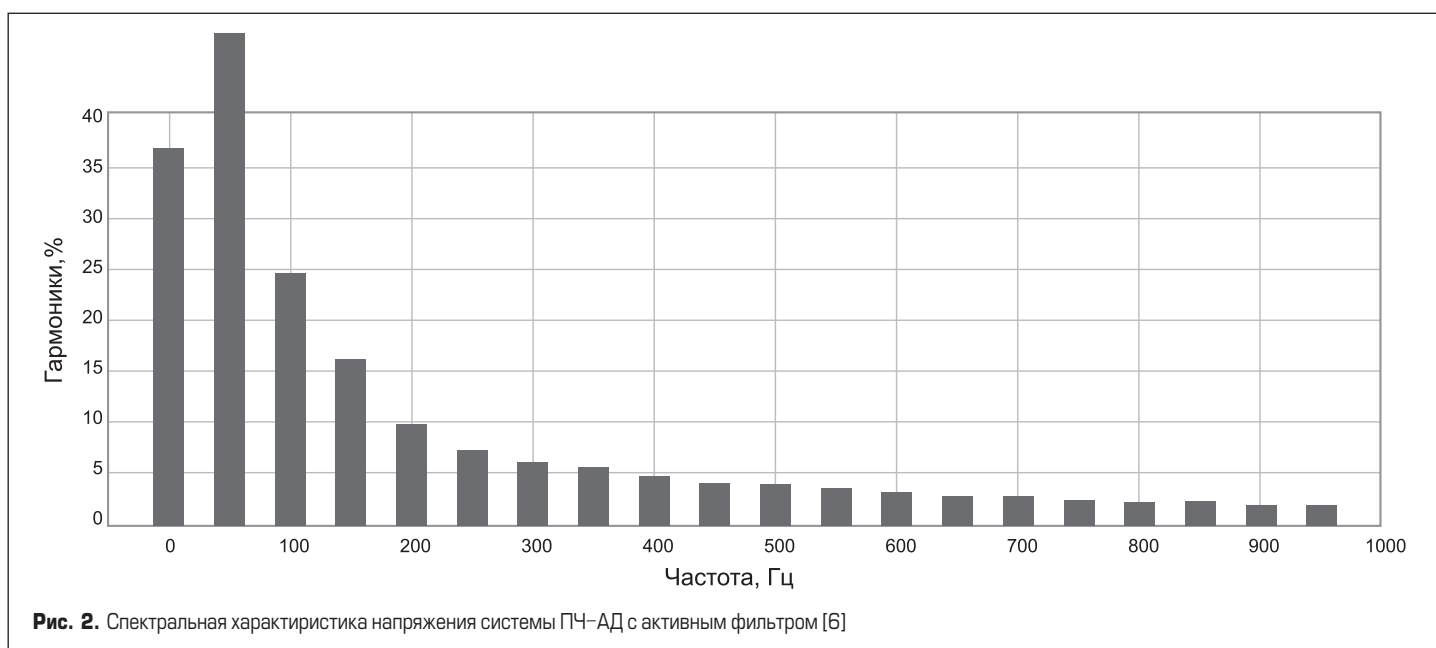


Рис. 2. Спектральная характеристика напряжения системы ПЧ-АД с активным фильтром [6]

Результаты вычисления THD_I на основе данных таблицы 1 свидетельствуют, что для определения его значения автор использовал 40 гармоник, а вероятно, и больше, поскольку такая возможность заложена в программном продукте MATLAB. На это косвенно указывает результат вычисления THD_I (28,90), поскольку при учете даже 20 гармоник этот коэффициент действительно не достигает значения 28,97%. Следует отметить, что в существующих приборах — анализаторах качества электричества — спектральный состав в соответствии с требованиями ГОСТ 32144-2013 ограничен 40 гармониками.

Далее остается непонятной целесообразность применения активного фильтра (АФ) без указания его характеристик, поскольку эффективность устройства оказалась очень низкой, то есть уменьшение THD_I произошло всего на 3%. По своему назначению же фильтр должен был существенно подавлять высшие гармоники тока нагрузки ПЧ-АД.

Как следует из таблицы 1, после применения АФ THD_U , наоборот, даже возрос. Это косвенно указывает на то, что измерение спектра напряжения осуществлялось на выходе АФ. В ином случае данный показатель должен был бы остаться неизменным, поскольку внутреннее сопротивление низковольтной электросети r_i обычно незначительное и не превышает 10 Ом.

Для наглядности и возможности подведения читателем результатов проведенных нами вычислений на рис. 2 представлен также график спектральной характеристики напряжения с АФ [6]. Автор, не приводя в тексте количественных сведений о THD_U , отмечает, что данный коэффициент с АФ повысился на 4,5%, что подтверждено и нашими расчетами. Поэтому повторно возникает вопрос, зачем автор применил активный фильтр, эффективность которого практически отсутствует. Из этих результатов также следует, что исследование влияния нагрузки на электросеть необходимо осуществлять только непосредственно по его входному току. Подключение же единичной нагрузки к электросети практически не позволяет выявить ее влияние на несинусоидальность самого напряжения электросети. Необходимо также иметь в виду, что в точке общего присоединения THD_I электросети всегда значительно меньше THD_I конкретной нагрузки за счет многократного превышения суммарного тока многочисленных линейных нагрузок над нелинейной составляющей тока нелинейных нагрузок [7].

Масштаб представления на графике спектрального состава гармоник напряжения тока с активным фильтром по оси ординат в статье [6] почти в три раза меньше, чем на графиках без фильтра, что заметно снижает его пригодность для сравнительного визуального сопоставления спектров. При этом надо отметить, что амплитуды первых гармоник тока и напряжения выходят далеко за пределы оси ординат.

В приводимых таблицах 1 и 2 даны значения только для первых шести нечетных гармоник, в то время как на рис. 1 и 2 представлено не только 20 гармоник, но и постоянные составляющие ряда Фурье. Вместе с тем следует отметить, что в основополагающих монографиях по качеству электрической энергии [3, 4] рассматриваются только нечетные гармоники, ибо четные гармоники настолько малы, что ими пренебрегают. Сравнения уровня гармоник тока в работе автора осуществляется относительно допустимых уровней тока, приведенных в ГОСТ 30804.3.12-2013, в то время как в нем не предусмотрен контроль четных гармоник.

Необходимо отметить, что четные гармоники и постоянная составляющая в спектральном составе напряжения непосредственно в электросети могут иметь место только при появлении заметной асимметрии между положительной и отрицательной полуволнами. Согласно представленному спектральному составу входного напряжения следует, что автор при моделировании, вероятно не придавая значения, изначально заложил асимметричную форму напряжения, очевидно послужившую источником четных гармоник и постоянной составляющей. Из приведенных в [6] спектров следует, что доля постоянной составляющей по напряжению без фильтра достигает 3%, а с АФ — уже 26%. По току увеличение амплитуды постоянной составляющей после применения АФ возрастает значительно, а именно с 16 до 67%. Такое явление может иметь место, если подключение АФ в систему ПЧ-АД еще больше повышало бы нелинейность нагрузки.

При сопоставлении гармоник напряжения с нормативными требованиями в работе используются данные устаревшего ГОСТ 13109-1997 вместо нового ГОСТ 32144-2013, предусматривающего значительно более жесткие требования к уровню четных гармоник.

Ранее проведенное нами физическое моделирование асимметрии полувольт входного напряжения показало, что по мере повышения постоянной составляющей в спектре питающего напряжения до 15–20% уровня происходит существенное ухудшение характеристик силового трансформатора, в итоге вызывающее его перегрев с последующим перегоранием.

Для коэффициента THD в аннотации и в тексте статьи приводятся в переводе с английского два разных наименования — «общее гармоническое искажение» и «коэффициент гармонических искажений», которые к тому же отличаются от термина, принятого в ГОСТ 32144-2013. Это в определенной степени связано с тем, что на сегодня для наименования THD применяют до 20 терминов. Во избежание разночтения и неопределенности возникла необходимость в проведении их унификации. После обстоятельного обсуждения вопроса предложено наименование THD ограничить одним

термином — «коэффициент нелинейных искажений» [8].

Проанализированная статья завершается фразой «Таким образом, окупаемость активного фильтра может быть достигнута в электродвигателях большой мощности, что приведет также к существенному уменьшению параметра несинусоидальности». Относительно этого заключения необходимо отметить, что в данной статье не были предметом изучения зависимости эффективности АФ от мощности двигателя и вопросы его окупаемости, а потому такое заключение делать было нельзя.

Вывод

Для получения достоверных результатов при моделировании работы системы ПЧ-АД большое значение имеет выбор адекватных исходных данных и корректная интерпретация итоговых результатов.

Литература

- Зырянов В. М., Митрофанов Н. А., Соколовский Ю. Б. Исследование гармонического состава напряжения преобразователя частоты // Вестник ИГЭУ. 2015. Вып. 1.
- Вахнина В. В., Дайненко А. В. Анализ синусоидальной формы кривой напряжения силового трансформатора при насыщении стали магнитопровода и при работе силового трансформатора на трехфазный выпрямитель // В сб. «Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники». Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Казань, 2019.
- Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. М.: Энергоатомиздат, 2004.
- Карташев И. И., Тульский В. Н., Шамонов Р. Г. и др. Управление качеством электроэнергии. Под ред. Шарова Ю. В. М.: Издательский дом МЭИ, 2006.
- Коверникова Л. И., Нго В. К. Влияние несинусоидальности режима на силовые трансформаторы. Сб. тр. Междунар. научно-практической конференции. М.: ООО «Центр полиграфических услуг «Радуга», 2018.
- Свиридов С. Г. Анализ частотного электропривода системы электродвижения судна // Практическая силовая электроника 2021. № 3.
- Семенова О. Д., Тукшаитов Р. Х. Об одном способе подключения «нелинейных» нагрузок для снижения уровня их влияния на качество напряжения электросети. Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники. Матер. III Всерос. науч.-практ. конф. Казань, 2021. Т. 1.
- Тукшаитов Р. Х., Семенова О. Д. О коэффициентах, применяемых для характеристики уровня высших гармоник тока и напряжения, и унификации их наименования. Часть 1 // Практическая силовая электроника. 2021. № 3.