

*М.С. Еришов, msershov@yandex.ru,
М.Ю. Чернев, makchernev@gmail.com,
РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Москва,
В.В. Чумаченко, chumachenko_vv@rtsoft.ru, АО «РТСофт», Москва*

ОБЗОР И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АНАЛИЗА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКИ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОБЪЕКТА НЕФТЕПЕРЕРАБОТКИ

Анализ роста нелинейной нагрузки и влияния на качество электроэнергии в системах электроснабжения нефтеперерабатывающих предприятий. Проблема обеспечения надлежащего качества электрической энергии стоит давно и усиливается по мере расширения применения полупроводниковой преобразовательной техники в промышленных системах электроснабжения (СЭС). Особенно остро проблема стоит в последнее время в связи с массовым внедрением низковольтных и высоковольтных частотно-регулируемых асинхронных приводов (ЧРП), что характерно и для предприятий нефтеперерабатывающей отрасли. Это обусловлено модернизацией производственной инфраструктуры нефтеперерабатывающих предприятий (НПП), включающей в себя операции по транспортировке жидкости, дозировке химических реагентов, вентиляции и поддержанию заданного температурного режима. Положительный эффект от внедрения ЧРП достигается за счет автоматизации режимов работы технологического

оборудования, повышения энергоэффективности производственных процессов, а также качества выпускаемой продукции [1, 2].

Анализ хода модернизации одного из нефтеперерабатывающих предприятий, расположенного в центральном регионе России, показал, что за период с 2006 по 2017 г. осуществлено внедрение частотно-регулируемых электроприводов, общая установленная мощность которых превышает 25 МВт. Это составляет 25 % фактически потребляемой активной мощности предприятия. При модернизации использовались электроприводы разных производителей (Vacon, Schneider-Electric, Siemens, ABB, Danfoss) мощностью от 0,37 до 1700 кВт.

График внедрения ЧРП по годам в процессы технологических установок НПП, детальное описание которых приведено в [3], представлен на рис. 1. Наибольшая установленная мощность внедренных ЧРП, равная 5517 кВт и 5897 кВт, приходится соответственно на 2013 и 2014 гг.

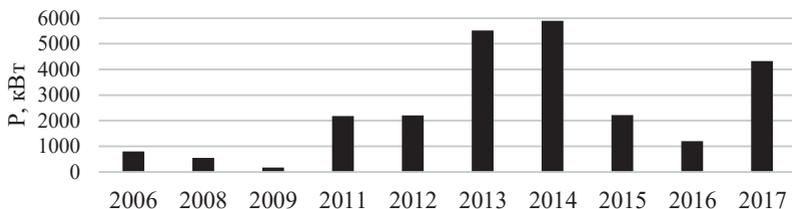


Рис. 1. Хронология внедрения ЧРП по установленной мощности

Распределение доли установленной мощности $S_{\text{ЧРП}}$ по классам напряжения представлено на рис. 2. Как видно из данного рисунка, преобладает установка низковольтных ЧРП (93 %).

Внедрение высоковольтной преобразовательной техники в СЭС НПП происходит гораздо медленнее из-за их высокой стоимости и сложности реализации технических решений для обеспечения гибкости ведения технологического процесса переработки нефтепродуктов приводимыми механизмами [4].

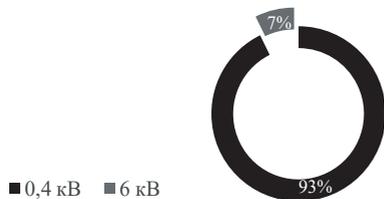


Рис. 2. Распределение ЧРП по классу напряжения на НПП

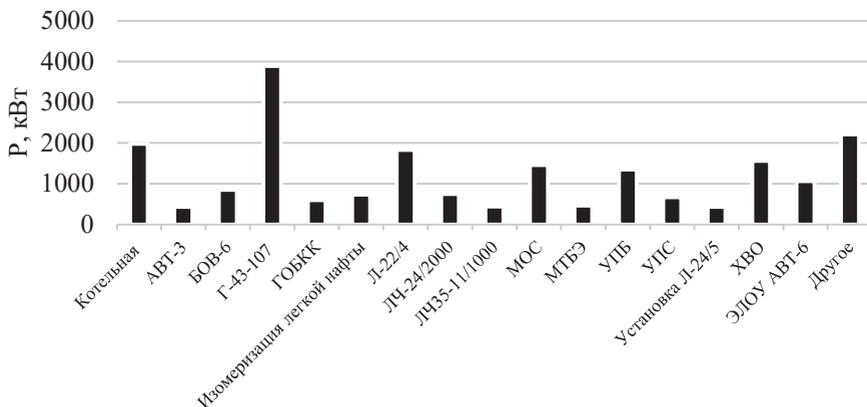


Рис. 3. Сравнение установленной мощности ЧРП технологических установок НПП

Анализ распределения установленной мощности нелинейных электроприемников между технологическими установками НПП представлен на рис. 3.

Из данного графика следует, что на установках АВТ-3, ГОБКК, ЛЧ-35-11/100, МТБЭ мощность ЧРП менее 500 кВт. На технологических установках БОВ-6, ГОБКК, изомеризации легкой нефти и УПС — в диапазоне 500—1000 кВт. На МОС, УПБ, ЭЛОУ АВТ-6 значения установленной мощности ЧРП находятся в диапазоне 1000—1500 кВт. На технологических установках «Котельная», Л-22/4, ХВО — в диапазоне 1500—2000 кВт, на Л-24/5 и ЛЧ-24/2000 — в диапазоне 2000—2500 кВт. Наибольшая установленная мощность ЧРП — 3893 кВт — на технологической установке Г-43-107, которая предназначена для производства компонентов высокооктановых бензинов «Евро-5».

Наибольшее значение соотношения установленной мощности ЧРП к мощности трансформатора $S_{\text{ЧРП}}/S_{\text{T}}$, как видно на рис. 4, также было выявлено для технологической установки Г-43-107.

Высокая доля установленной мощности ЧРП и отсутствие строго формализованного алгоритма и методик для проверки электромагнитной обстановки на базе отечественных стандартов при его внедрении и эксплуатации в распределительных сетях привели к неблагоприятной электромагнитной обстановке на НПП, вызвавшей повреждение эксплуатируемого дорогостоящего электрооборудования.

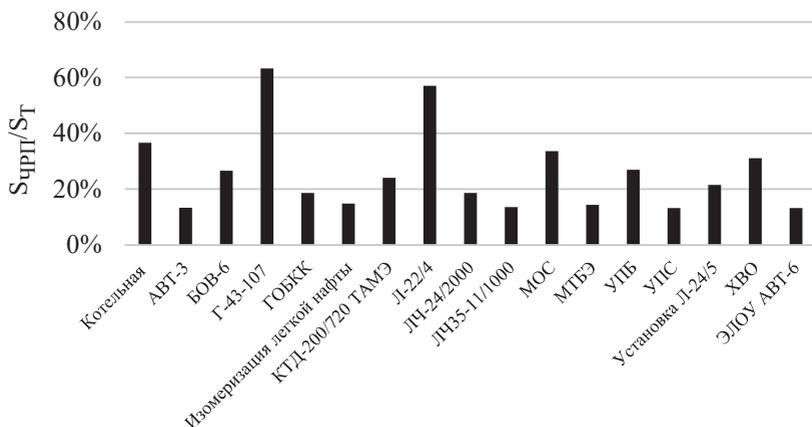


Рис. 4. Сравнение установленной мощности ЧРП технологических установок НПП по отношению к мощности трансформаторов

Обзор показателей нормирования гармонических составляющих напряжения и тока для узлов нагрузки и элементов системы электроснабжения нефтеперерабатывающих производств. В настоящее время основным стандартом по нормированию показателей качества ЭЭ в СЭС отечественных НПП является ГОСТ 32144–2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества ЭЭ в СЭС общего назначения». Настоящий стандарт предназначен для нормирования показателей качества электроэнергии (КЭ), связанных с характеристиками напряжения электропитания, относящихся к частоте, значениям и форме напряжения, гармоническим составляющим напряжения, а также к симметрии напряжений в трехфазных системах электроснабжения.

ГОСТ 32144–2013 устанавливает показатели и нормы КЭ в точке передачи ее пользователям ЭС низкого, среднего и высокого напряжения СЭС общего назначения переменного тока частотой 50 Гц и вводит показатель нормирования гармонических составляющих напряжения в основных узлах нагрузки является суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения (СКГСН) или Total Harmonic Distortion Voltage [THD(U)]:

$$\text{СКГСН} = \text{THD}(U) = \sqrt{\sum_{n=2}^{40} \frac{U_n^2}{U_1^2}} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где n — порядок гармоники; U_1 — номинальное напряжение электропитания, В; U_n — напряжение гармонической составляющей, В.

Необходимо отметить, что отечественный стандарт ГОСТ 32144–2013 не нормирует высшие гармонические составляющие токов, являющиеся первопричиной возникновения высших гармонических составляющих напряжения, а нелинейные искажения тока в СЭС НПП рассматриваются через гармонические составляющие напряжения [5, 6].

На основании проведенных авторами исследований и опыта эксплуатации установлено, что анализ гармонических искажений, основанный на данном показателе, в большинстве случаев не позволяет обеспечить безопасную эксплуатацию электрооборудования в СЭС НПП, содержащих ЧРП. Это свидетельствует о необходимости определения дополнительных показателей нормирования гармонических составляющих тока для ветвей нагрузки, а также для элементов системы электроснабжения НПП. Предлагается использовать знания и международные стандарты, для дополнения отечественных стандартов и исключения описанных выше недостатков.

В международных требованиях для нормирования гармонических искажений тока в ТОП СЭС промышленного предприятия для оценки влияния гармонических токов на силовое электрооборудование зарубежный стандарт IEEE Std 519–2014 [7] вводит понятие total demand distortion (TDD):

$$\text{TDD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{50} I_h^2}}{I_L} \cdot 100 \%, \quad (2)$$

где I_h — ток n -й гармонической составляющей, А; I_L — значение максимального продолжительно потребляемого тока нагрузки, А.

Кроме основных показателей нормирования гармонических составляющих напряжения и тока для узлов и ветвей нагрузки СЭС НПП, необходимы также индивидуальные показатели для контроля ресурса основных элементов систем электроснабжения (трансформаторов, кабельных линий, устройство компенсации реактивной мощности, асинхронных двигателей), дополняющих оценку электромагнитной обстановки системы электроснабжения.

Так, для оценки допустимой загрузки асинхронных электродвигателей с учетом дополнительных потерь, вызванных несинусоидальностью напряжения, стандарт ANSI/NEMA MG 1–2016 «Standard for Voltage Stress in Motors and Drives» [8] вводит Harmonic Voltage Factor (HVF), или взвешенный коэффициент искажения напряжения двигателя (ВКИНД):

$$\text{ВКИНД} = \sqrt{\sum_{n=2}^{13} \frac{(U_n)^2}{n}}. \quad (3)$$

В качестве критерия определения перегрузки конденсаторных батарей токами высших гармоник производитель регуляторов КМВ systems серии NOVAR 24xx УКРМ [9] вводит коэффициент гармонической нагрузки конденсаторов (КГНК), или capacitor harmonic load factor (CHL):

$$\text{КГНК} = \sqrt{\sum_{n=1}^N \left(\frac{nU_n}{U_{\text{НОМ}}} \right)^2} 100 \% . \quad (4)$$

Для оценки эффекта нагрева кабельной линии и ее максимально допустимого тока нагрузки ($I_{RMS\text{eff}}$) с учетом несинусоидальности тока O'Connell К. в своей работе [100] предложил показатель Heating Derating Factor (HDF):

$$\text{HDF} = \sum_{n=1}^N \left[\left(\frac{I_n}{I_{RMS}} \right)^2 \frac{R_n}{R_1} \right], \quad (5)$$

где I_{RMS} — действующее значение тока нагрузки, А; R_1 — активное сопротивление кабеля на промышленной частоте, Ом; R_n — сопротивление проводника на частоте n -й гармоники, Ом.

Для расчета данного коэффициента необходимо рассчитать активное сопротивление кабеля для каждой n -й гармоники [11]:

$$R_n = R_1 \sqrt{n} . \quad (6)$$

Согласно [100] значение рабочей температуры кабельной линии в условиях перегрузки токами высших гармоник рассчитывается как

$$\theta_{op} = \theta_A + 40 \text{ HDF} , \quad (7)$$

где θ_A — температуру окружающей среды, °С; θ_{op} — рабочая температура кабельной линии, °С.

Для оценки негативного влияния несинусоидальности тока на сухие трансформаторы согласно [12] используется коэффициент k -factor, который позволяет проводить анализ допустимости фактической загрузки трансформатора с учетом потерь на вихревые токи на основе методики, предложенной компанией АВВ [13]:

$$k\text{-factor} = \sum_{n=2}^N \left(\frac{I_n}{I_{rms}} \right)^2 n^{1.5} . \quad (8)$$

На основании значения коэффициента k -factor согласно табл. 1 рассчитывается допустимая мощность трансформатора с учетом несинусоидальности тока [133]:

$$S_{T k\text{-factor}} = \frac{S_T}{k_3 k\text{-factor}}, \quad (9)$$

где S_T — номинальная мощность трансформатора, кВ·А; $S_{T k\text{-factor}}$ — максимальная допустимая мощность силового трансформатора с учетом несинусоидальности тока, кВ·А; $k_3 k\text{-factor}$ — коэффициент допустимой загрузки сухого трансформатора с учетом несинусоидальности тока.

Таблица 1

Соответствие между k -factor и $k_3 k\text{-factor}$

k -factor, о.е.	2	2,0	3,0	4,0	5,0	7,0	9,0	10,0	11,0	12,0	13,0
$k_3 k$ -factor, о.е.	1	1,02	1,04	1,06	1,08	1,12	1,15	1,17	1,19	1,2	1,22

Для безопасной эксплуатации силового электрооборудования в СЭС НПП, содержащих ЧРП, его производители устанавливают собственные требования к уровню СКГСН в зависимости от технических характеристик их оборудования. Так, например, для сухого трансформатора с литой изоляцией Trihal стандартного исполнения производства Schneider-Electric согласно требованиям производителя, значение СКГСН_T не должно превышать 5 %. А для УКРМ классического исполнения без фильтрующих дросселей компанией ООО «КВАР» значение СКГСН_{УКРМ} не должно превышать 1 %.

Выводы

1. На основании проведенного анализа тенденций роста и распределения установленной мощности нелинейных электроприемников нефтеперерабатывающего производства между технологическими установками НПП выявлены системы электроснабжения с наиболее плохой электромагнитной обстановкой.

2. Предложен расширенный набор показателей качества электроэнергии, который обобщает отечественный и международный опыт обеспечения надлежащего уровня электромагнитной совместимости в системах электроснабжения НПП и способствует более точной оценке электромагнитной обстановки в практике эксплуатации СЭС НПП.

Литература

1. **Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А., Устинов Д.А.** Электроснабжение нефтегазовых предприятий: учеб. пособие. СПб.: Санкт-Петербургский государственный горный институт, 2008. 81 с.
2. **Беляев В.Л., Радимов С.Н.** Гармонический состав сетевого тока частотных электроприводов с широтно-импульсной модуляцией // Электромеханические и энергосберегающие системы. 2012. № 3. С. 469—471.
3. **Автоматизация** процессов нефтепереработки / А.Д. Ермоленко, О.Н. Кашин, Н.В. Лисицын и др.; под ред. В.Г. Харазова. СПб.: Профессия, 2012. 304 с.
4. **Скакунов Д.А.** Методы и средства обеспечения качества электрической энергии в распределительных сетях 0,4—6 кВ нефтеперерабатывающих предприятий: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03. Красноярск, 2010. 150 с.
5. **Ершов М.С., Чернев М.Ю.** Анализ электромагнитной совместимости при принятии решения о подключении частотно-регулируемых электроприводов // Фёдоровские чтения – 2019: XLIX Международная научно-практическая конференция с элементами научной школы (Москва, 20—22 ноября 2019 г.). М.: Издательский дом МЭИ, 2019. С. 119—127.
6. **Ершов М.С., Чернев М.Ю.** Определение и оценка показателей эмиссии гармонических составляющих токов от низковольтных асинхронных частотно-регулируемых приводов // Изв. вузов. Электромеханика. 2019. Т. 62. № 1. С. 59—64.
7. **IEEE 519–2014** IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. URL: <https://standards.ieee.org/content/ieee-standards/en/standard/519-2014.html>
8. **ANSI/NEMA MG 1–2016** Standard for Voltage Stress in Motors and Drives.
9. **NOVAR 24xx** Three-Phase Power Factor Controllers & Multimeters : Operating Manual [Electronic resource] // KMB systems. 2014. № 5. URL: http://www.zavodny.cz/data/manualy_novar/novar2418.pdf
10. **O’Connell K.** Heating Effects Through Harmonic Distortion on Electric Cables in the Built Environment [Electronic resource] / Dublin Institute of Technology. 2013. URL: https://arrow.tudublin.ie/cgi/viewcontent.cgi?article=1058&context=eng-doc_27
11. **Жежеленко И.В.** Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. 6-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 2010. 375 с.
12. **C57.110–2018** IEEE Recommended Practice for Establishing Liquid-Immersed and Dry-Type Power and Distribution Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents.
13. **Loading** transformers with non sinusoidal currents : K Factor [Electronic resource] // ABB. 2007. URL: https://library.e.abb.com/public/be0ca-daf6a6708fcc1257792005162cb>Loading_transformers_with_non_sinusoidal_currents_KFactor.pdf