

УДК 621.311

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

**О. Г. ШИРОКОВ, Т. В. АЛФЁРОВА, Ю. А. РУДЧЕНКО,
О. С. ШВЕДОВА**

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Представлены результаты экспериментальных исследований влияния электротермического оборудования на качество электрической энергии в системе электроснабжения промышленных предприятий. Получены диаграммы коэффициентов n -х гармонических составляющих напряжения на шинах 0,4 кВ главного привода двигателя печи цементного завода, позволяющие определить показатели качества электрической энергии при работе электротермического оборудования и оценить степень его влияния на систему электроснабжения.

Ключевые слова: электротермическое оборудование, система электроснабжения, качество электроэнергии, электромагнитная совместимость.

EFFECTS OF ELECTROTHERMAL EQUIPMENT FOR ELECTRIC POWER QUALITY IN POWER SUPPLY SYSTEM OF INDUSTRIAL ENTERPRISES

**O. G. SHIROKOV, T. V. ALFEROVA, Y. A. RUDCHENKO,
O. S. SHVEDOVA**

*Educational institution "Sukhoi State Technical University
of Gomel", the Republic of Belarus*

The article presents the results of experimental studies of the influence of electrothermal equipment on the quality of electric energy in the power supply system of industrial enterprises. Diagrams of coefficients of n -harmonic components of voltage on tires 0.4 kV of the main motor drive of the cement plant furnace are obtained, which allow to determine parameters of electric energy quality during operation of electrothermal equipment and to estimate the degree of its influence on the power supply system.

Keywords: electrothermal equipment, power supply system, quality of electric energy, electromagnetic compatibility.

Введение

Рост установленной мощности нелинейных, а также несимметричных и резкопеременных (ударных) нагрузок промышленных предприятий привел к существенному увеличению уровня электромагнитных помех (ЭМП) в системах электроснабжения предприятий и электрических сетях. Эти помехи в зависимости от их характера, интенсивности и продолжительности неблагоприятно влияют на силовые электроустановки, системы автоматики, релейной защиты и телекоммуникации, а также электрооборудование, являющееся источником ЭМП. В ряде случаев это приводит к снижению надежности электроснабжения, увеличению потерь электрической энергии (ЭЭ), ухудшению качества и уменьшению количества выпускаемой продукции.

Эти обстоятельства обуславливают практическую значимость проблемы качества электроэнергии [1].

Цель работы – исследование степени влияния электротермического оборудования на качество электроэнергии в системе электроснабжения промышленных предприятий.

Основная часть

Влияние электромагнитных помех на электротермические установки

Режим работы каждой электротермической установки характеризуется определенными параметрами режима (ток, температура, угол управления и т. д.), значения которых зависят не только от вида, назначения, конструкции установки и особенностей технологического процесса, но и от параметров поступающей в электротермическую установку электрической энергии. Эффективность работы всех электротермических установок во многом определяют наличием в питающей сети ЭМП, при этом они могут оказывать влияние и непосредственно на физику протекающих процессов, и на отдельные элементы электрооборудования электротермических установок. В целом это приводит к изменению технико-экономических показателей этих установок. Наибольшее влияние на эффективность работы электротермических установок оказывают отклонения напряжения как вверх, так и вниз от номинального значения, которые приводят к изменению производительности, расходов и потерь электроэнергии.

На некоторые виды электротермических установок (индукционные печи, установки с преобразователями частоты) оказывают влияние отклонения частоты. Если в состав электротермических установок входят конденсаторы, то существенное влияние на них оказывают искажения формы кривой напряжения (несинусоидальность напряжения).

Колебания и провалы напряжения не оказывают влияния на электротермические установки в силу их значительной тепловой инерции. Несимметрия напряжения ощутимого действия на экономические характеристики электротермических установок не оказывает, однако для однофазных установок ее надо учитывать, так как несимметрия влияет на отклонение напряжения.

Все виды ЭМП оказывают существенное воздействие на системы управления электротермических установок. При отклонениях напряжения в пределах $\pm 10\%$ от номинального брака продукции или изменения ее качества нарушения технологических процессов для большинства электротермических установок не наблюдаются [4].

Печи сопротивления периодического действия (печи отжига)

Работа этих печей с напряжением, отличным от номинального, сопровождается соответствующим изменением мощности, потребляемой нагревателями печи [4]:

$$P = \frac{U_{\phi}^2}{R} = \frac{(U_{\text{ном}} K_{\text{ном}})^2}{R} = P_{\text{ном}} K_t^2 U. \quad (1)$$

Что, в свою очередь, влечет за собой изменение времени нагрева печи и садки t_n :

$$t_n = \frac{(W_{\text{ак}} + W_{\text{с}})}{(P_{\text{ном}} K_U^2 \Delta P_T)}, \quad (2)$$

где $W_{\text{с}}$ – полезная энергия, идущая непосредственно на технологический процесс (нагрев садки); $W_{\text{ак}}$ – энергия, аккумулируемая печью.

По выражению (2) можно определить изменение времени нагрева при отклонениях напряжения. В относительных единицах формула (2) имеет вид:

$$t_n = \frac{(1 - \Delta P_{T*})}{(K_U^2 - \Delta P_{T*})}, \quad (3)$$

где $\Delta P_{T*} = \Delta P_T / P_{ном}$ – доля тепловых потерь в энергетическом балансе; ΔP_T – средняя мощность тепловых потерь за время t .

Дуговые сталеплавильные печи

Режим работы дуговой сталеплавильной печи (ДСП) резкопеременный, с большими пиками тока в период расплавления. Колебания токов отдельных фаз при этом возникают одновременно, что приводит к несимметрии токов и напряжений. Случайный процесс колебаний токов ДСП в течение всего периода расплавления не является стационарным, так как по ходу процесса происходит постепенное изменение состояния расплавляемой шихты и условий горения дуги, а также изменение мощности и напряжения на электродах [5]. Однако, учитывая постепенный характер изменения состояния расплавляемой шихты и рассматривая процесс при установившемся режиме, его можно разложить на отдельные стационарные участки длительностью 2–5 мин, на которых не происходит существенного изменения среднего значения тока и размахов его колебаний [5].

Из всех электротермических установок ДСП создают наибольшие значения различных видов ЭМП, среди которых доминирующими являются отклонения, провалы и колебания напряжения, несинусоидальность и несимметрия токов и напряжений. При этом наибольший уровень помех создается в период расплавления твердой шихты [6].

Задержки зажигания дуг и сильная нелинейность их вольт-амперных характеристик приводят к появлению в спектре тока высших гармоник. ДСП генерируют как нечетные (3, 5, 7, 9-ю и т. д.), так и четные (2, 4, 6, 8-ю и т. д.) гармоники тока. Значения этих гармоник носят случайный характер, поэтому нет точных формул для их определения. В проектной практике действующее значение нечетных гармоник ДСП можно определить по следующему приближенному выражению:

$$I_{(n)\text{эф}} = \frac{S_{п.т}}{(\sqrt{3}nU_{ном})}, \quad (4)$$

где $S_{п.т}$ – мощность печного трансформатора; n – номер гармоники.

Колебания напряжения, создаваемые ДСП, делятся на два вида: нерегулярные – с частотой до 1 Гц; регулярные (циклические) – с частотой от 1 до 10 Гц [5]. Основными причинами нерегулярных колебаний являются неблагоприятные условия зажигания дуг в период расплавления и неустойчивое их горение, короткие замыкания электродов с шихтой в момент пуска печи и при обвалах шихты, обрывы дуг при обвалах, резкие перемещения электродов вследствие коротких замыканий и обрывов дуг. Поскольку броски тока при нерегулярных колебаниях достигают 100 % номинального тока печного трансформатора, то значение размаха нерегулярных колебаний напряжения достигает 7–12 %. Причины возникновения регулярных колебаний: действие внешних и внутренних электромагнитных сил, стремящихся вытолкнуть дуги из-под электродов в сторону стенок печи, вибрация электродов и электродержателей, выпрямительный эффект, внезапные изменения проводимости в зоне горения дуг вследствие испарения материалов и др.

Методы и средства обеспечения электромагнитной совместимости

Одним из основных способов обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) помехочувствительных электроприемников является разделение на-

грузок, являющихся источниками ЭМП (ДСП, печи обжига, сварочные установки и др.), и других нагрузок до уровня, при котором обеспечивается их ЭМС. Наиболее распространенными техническими средствами, используемыми для разделения нагрузок, являются сдвоенные реакторы, а также трансформаторы с расщепленными обмотками и трехобмоточные трансформаторы.

Распространенным техническим средством, применяемым для снижения колебаний напряжения, являются быстродействующие статические тиристорные компенсаторы (СТК). Степень компенсации колебаний напряжения зависит от времени запаздывания системы управления, которое должно быть по возможности минимальным [7].

Тиристоры, используемые в качестве коммутирующих ключей в цепи реактора, генерируют высшие гармоники (ВГ). Для уменьшения их уровня на шины СТК подключают резонансные фильтры ВГ. На практике выбор мощности СТК следует производить по значениям набросов реактивной мощности с учетом допустимого значения дозы фликера P_{st} и P_{lt} .

Для компенсации ВГ 2-го и 3-го порядков, а также интергармоник (ИГ) в случае «густого» спектра целесообразно применение демпфирующего фильтрокомпенсирующего устройства, которое состоит из конденсатора и реактора, параллельно которому подключается активное сопротивление.

Активные фильтры (АФ) являются весьма перспективными многофункциональными устройствами, обеспечивающими, в зависимости от схем, фильтрацию высших и интергармоник, компенсацию реактивной мощности, уменьшение глубины и длительности провалов напряжения, регулирование напряжения у потребителя [8]. В общем случае АФ представляют собой источники реактивного тока основной частоты, ВГ и ИГ и предназначены для их компенсации. В качестве АФ используют инверторы напряжения, построенные на тиристорах или транзисторах. Активный фильтр включается или параллельно нагрузке, или последовательно в расщелку линии. Устройство управления с передаточной функцией обеспечивает формирование управляющих сигналов согласно алгоритму, позволяющему АФ генерировать компенсирующий реактивный ток основной частоты и токи ВГ и ИГ нелинейной нагрузки.

Оценка показателей качества электроэнергии на шинах 0,4 кВ главного привода двигателя второй печи цементного завода

С учетом допущений, разрешаемых ГОСТ 32144–2013, ГОСТ 30804.4.30–2013 [2], [3], технические задачи приборного контроля показателей качества электрической энергии могут пока решаться с помощью выпускавшегося в Республике Беларусь устройства контроля параметров качества электрической энергии УК1, обеспечивающего, как минимум, измерение всех показателей КЭ по классу В. Этим устройством были выполнены измерения показателей КЭ на шинах 0,4 кВ главного привода двигателя второй печи цементного завода.

Положительное отклонение напряжения $\delta U_{(+)}$ за время измерения показателей КЭ на шинах 0,4 кВ электродвигателя второй печи превышало допустимое значение с вероятностью 99,9 %. При этом наибольшее значение положительного отклонения напряжения $\delta U_{(+)}$ за время измерения составило 13,93 %, наименьшее значение составило 9,65 %. График изменения значений $\delta U_{(+)}$ в процентах представлен на рис. 1, а его гистограмма – на рис. 2 (на рисунках – установившееся отклонение напряжения δU_y за время измерения).

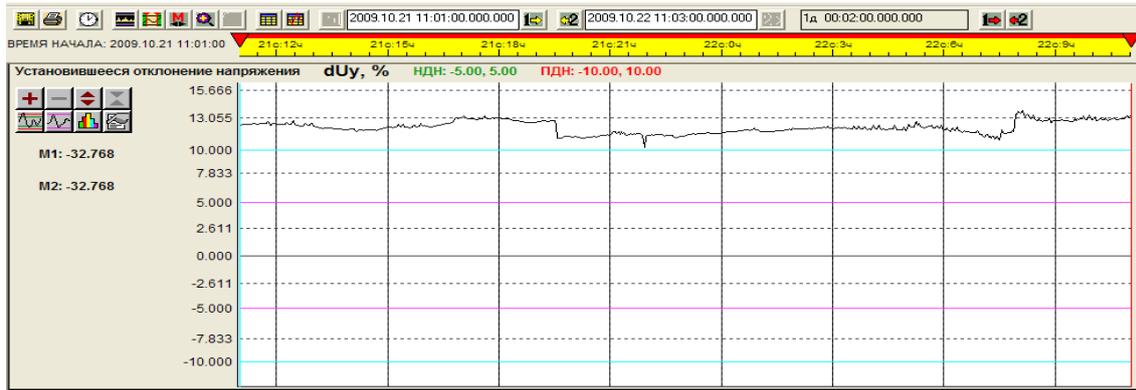


Рис. 1. График изменения значений $\delta U_{(+)}$ за время измерения на шинах 0,4 кВ электродвигателя второй печи

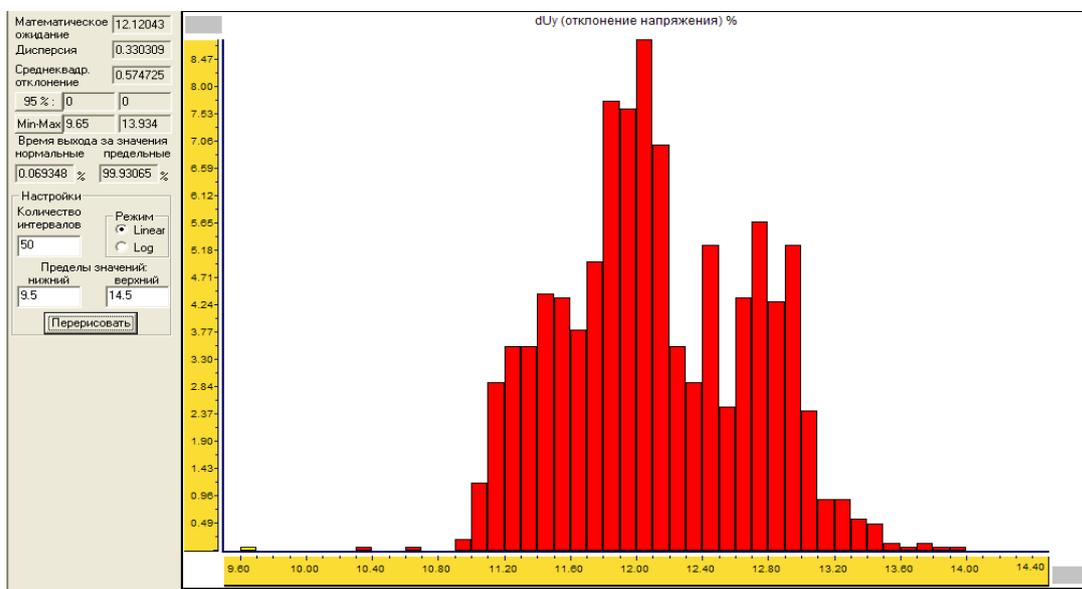


Рис. 2. Гистограмма положительного отклонения напряжения $\delta U_{(+)}$ на шинах 0,4 кВ электродвигателя второй печи

Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения K_U , например, по фазе A за время измерения на шинах 0,4 кВ электродвигателя второй печи превышал допустимое значение с вероятностью 99,99 %. При этом наибольшее значение коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения K_U по фазе A за время измерения составляло 16,28 % (при нормально и предельно допустимых значениях для номинального напряжения 0,38 кВ, равных 8 и 12 %). График изменения значений суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения K_U по фазе A за время измерения представлен на рис. 3, а его гистограмма – на рис. 4 (на рисунках – коэффициент искажения синусоидальности напряжения K_U).

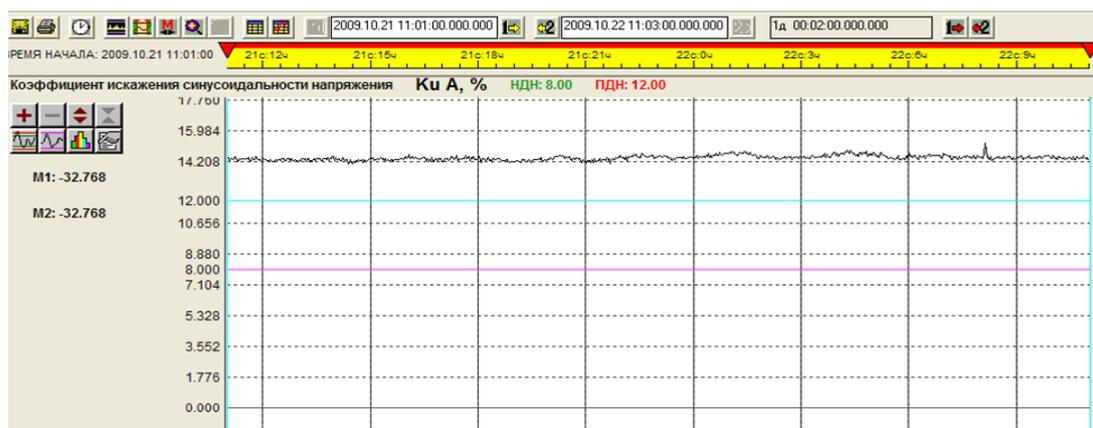


Рис. 3. График изменения значений суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения K_U по фазе A за время измерения на шинах 0,4 кВ электродвигателя второй печи

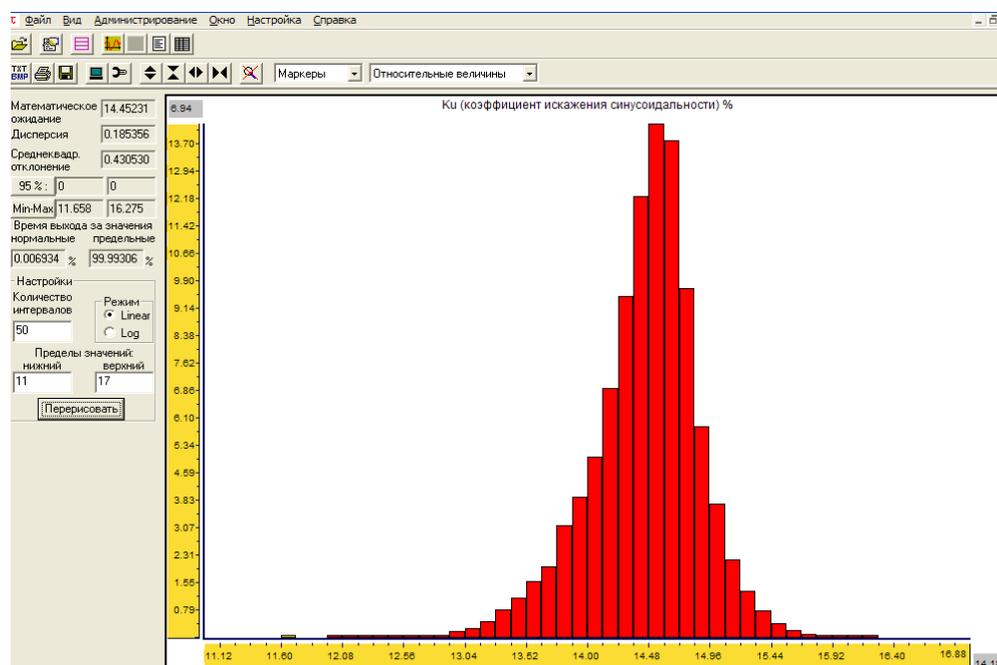


Рис. 4. Гистограмма суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения K_U по фазе A на шинах 0,4 кВ электродвигателя второй печи

За время измерения на шинах 0,4 кВ электродвигателя второй печи значения коэффициентов 2, 3, 6, 8, 9, 10, 12, 14, 15, 16, 18, 20, 21, 22, 24, 26, 27, 28, 30, 32, 33, 34, 36, 38, 39 и 40 гармонических составляющих напряжения фазы A , значения коэффициентов 2, 3, 6, 8, 9, 10, 12, 14, 15, 16, 18, 20, 21, 22, 24, 26, 27, 28, 30, 32, 33, 34, 36, 38, 39 и 40 гармонических составляющих напряжения фазы B , значения коэффициентов 2, 3, 6, 8, 9, 10, 12, 14, 15, 16, 18, 20, 21, 22, 24, 26, 27, 28, 30, 32, 33, 34, 36, 38, 39 и 40 гармонических составляющих напряжения фазы C не соответствовали требованиям ГОСТ 32144–2013 [2]. Кратковременно выходили за пределы нормально допустимых значений [2, табл. 3] коэффициенты 4-й гармонической составляющей напряжения по всем трем фазам. Сравнительные диаграммы значений коэффициентов гармонических составляющих напряжения K_{Un} в фазах A , B и C представлены на рис. 5–7 соответственно.



Рис. 5. Диаграмма значений коэффициентов гармонических составляющих напряжения $K_{U(n)}$ фазы А на шинах 0,4 кВ электродвигателя второй печи:
 ■ – ДЗ; ■ – НДЗ; ■ – ПДЗ

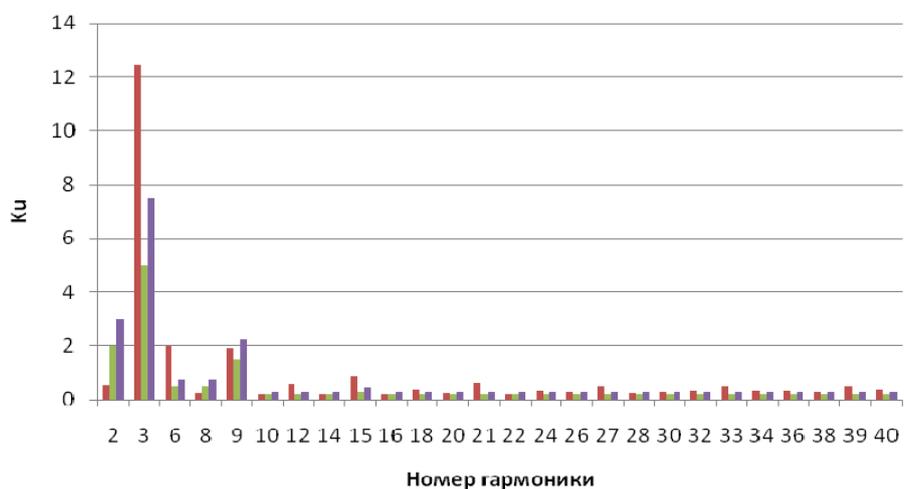


Рис. 6. Диаграмма значений коэффициентов гармонических составляющих напряжения $K_{U(n)}$ фазы В на шинах 0,4 кВ электродвигателя второй печи:
 ■ – ДЗ; ■ – НДЗ; ■ – ПДЗ

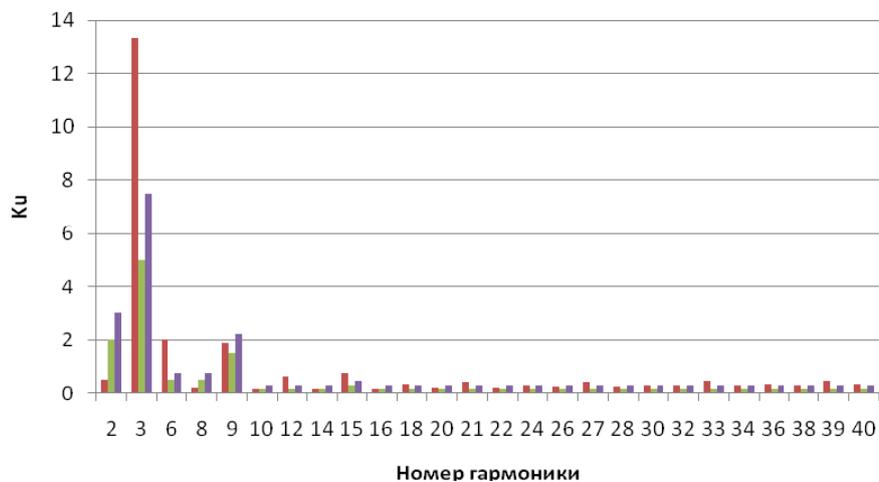


Рис. 7. Диаграмма значений коэффициентов гармонических составляющих напряжения $K_{U(n)}$ фазы С на шинах 0,4 кВ электродвигателя второй печи:
 ■ – ДЗ; ■ – НДЗ; ■ – ПДЗ

На диаграммах рис. 5–7: ДЗ – измеренное значение коэффициентов гармонических составляющих напряжения $K_{U(n)}$; НДЗ – нормально-допустимое значение коэффициентов гармонических составляющих напряжения $K_{U(n)}$ [2, табл. 1–3]; ПДЗ – предельно-допустимое значение коэффициентов гармонических составляющих напряжения $K_{U(n)}$ – увеличенные в 1,5 раза значения [2, табл. 1–3].

Коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} за время измерения на шинах 0,4 кВ электродвигателя второй печи не выходил за пределы нормально допустимых значений. При этом наибольшее значение коэффициента K_{2U} составляло 0,48 % (при нормально допустимом и предельно допустимом значениях коэффициента K_{2U} в точках общего присоединения к электрическим сетям, равных 2,0 и 4,0 % соответственно).

Коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности K_{0U} за время измерения на шинах 0,4 кВ электродвигателя второй печи кратковременно с вероятностью 0,04 % выходил за пределы нормально допустимых значений. При этом наибольшее значение коэффициента K_{0U} составляло 2,73 % (при нормально допустимом и предельно допустимом значениях коэффициента K_{0U} в точках общего присоединения к электрическим сетям, равных 2,0 и 4,0 % соответственно),

Кратковременная доза фликера P_{st} и длительная доза фликера P_{lt} за время измерения на шинах 0,4 кВ электродвигателя второй печи выходили за пределы допустимых значений. При этом наибольшее значение кратковременной дозы фликера P_{st} для фазы *A* составляло 2,79 о. е., для фазы *B* – 2,79 о. е., для фазы *C* – 2,77 о. е. (при допустимом значении P_{st} , равном 1,38 о. е.). Наибольшее значение длительной дозы фликера P_{lt} для фазы *A* составляло 1,81 о. е., для фазы *B* – 1,73 о. е., для фазы *C* – 1,73 о. е. (при допустимом значении P_{lt} , равном 1,0 о. е.). График изменения значений длительной дозы фликера P_{lt} для фазы *A* за время измерения представлен на рис. 8.

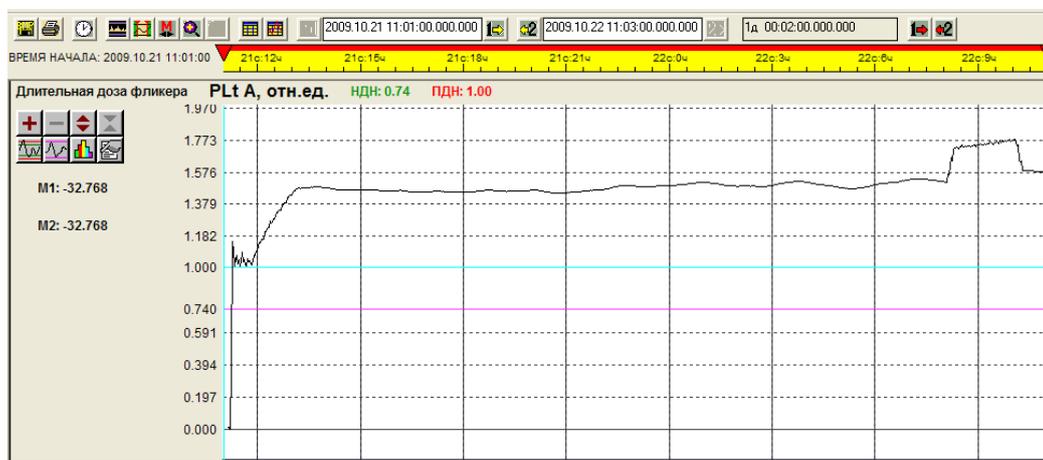


Рис. 8. График изменения значений длительной дозы фликера P_{lt} фазы *A* за время измерения на шинах 0,4 кВ электродвигателя второй печи

Из случайных событий за период измерения были зарегистрированы перенапряжения в форме коэффициентов временного перенапряжения $K_{перU}$ по [9]. В фазе *A* за время измерения зарегистрировано 1862 временных перенапряжения с $K_{перU}$ не менее 1,1 о. е. и длительностью $\Delta t_{перU}$ не менее 10 мс, в фазе *B* за время измерения зарегистрировано 1802 временных перенапряжения с $K_{перU}$ не менее 1,1 о. е. и с $\Delta t_{перU}$ не менее 10 мс, в фазе *C* – 1800 временных перенапряжений с $K_{перU}$ не менее 1,1 о. е. и с $\Delta t_{перU}$ не менее 10 мс. График зарегистрированных временных перенапряжений в фазе *C* представлен на рис. 9.

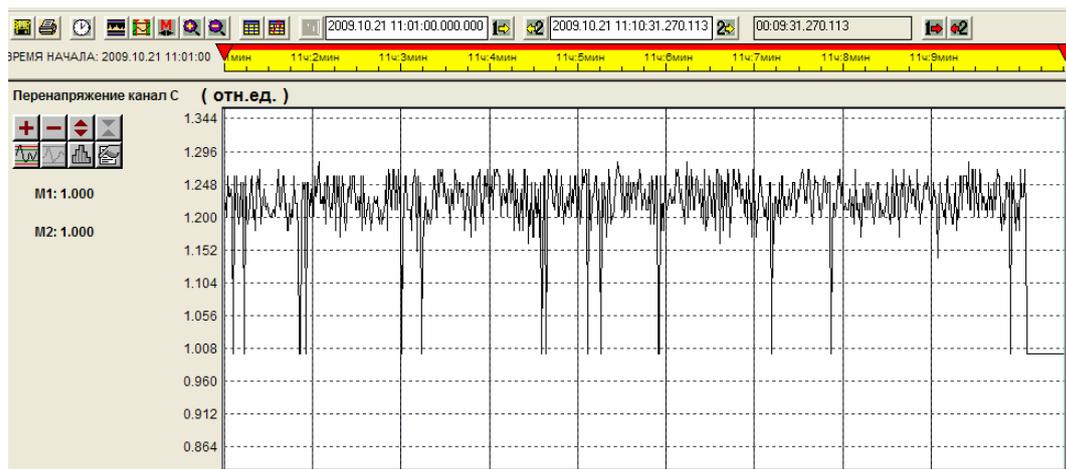


Рис. 9. График временных перенапряжений, зарегистрированных в фазе С на шинах 0,4 кВ электродвигателя второй печи

Заключение

Выполненные измерения и их оценка показали, что электротермическое оборудование может значительно влиять на качество электроэнергии в системе электроснабжения промышленного предприятия. В рассмотренном случае из продолжительных изменений характеристик напряжения превышали предписанные в [2] нормы: значение положительного отклонения напряжения $\delta U_{(+)}$; значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения K_U ; значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения $K_{U(n)}$; значения кратковременной дозы фликера P_{st} и длительной дозы фликера P_{lt} . Из случайных событий было зарегистрировано значительное количество перенапряжений, однако значение перенапряжений не превышало $1,3 U_{ном}$.

Литература

1. Жежеленко, И. В. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях / И. В. Жежеленко, Ю. Л. Саенко. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 2005. – 261 с.
2. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения (EN 50160:2010, NEQ) : ГОСТ 32144–2013. – Минск : Госстандарт, 2015. – 16 с.
3. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии : ГОСТ 30804.4.30–2013 (IEC 61000–4–30:2008). – М. : Стандартинформ, 2014. – 52 с.
4. Шваб, А. И. Электромагнитная совместимость : пер. с нем. / А. И. Шваб. – М. : Энергоатомиздат, 1995. – 480 с.
5. Влияние дуговых электропечей на системы электроснабжения / под ред. М. Я. Смелянского, Р. В. Минеева. – М. : Энергия, 1975. – 184 с.
6. Иванов, В. С. Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий / В. С. Иванов, В. И. Соколов. – М. : Энергоатомиздат, 1967. – 336 с.
7. Шидловский, А. К. Высшие гармоники в низковольтных электрических сетях / А. К. Шидловский, А. Ф. Жаркин. – Киев : Наукова думка, 2005. – 209 с.

8. Жежеленко, И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И. В. Жежеленко. – М. : Энергоатомиздат, 2004. – 358 с.
9. Качество электрической энергии. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения : ГОСТ 13109–97. – М. : Изд-во стандартов, 2001. – 44 с.

Дата получения 15.11.2021 г.