

Методика расчета кратковременной дозы фликера в сетях с дуговыми сталеплавильными печами

Новосёлов Н. А., инж.

ОАО “Челябинский трубопрокатный завод”

Николаев А. А., канд. техн. наук, Корнилов Г. П., доктор техн. наук
ФГБОУ ВПО “Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова”

Предложена методика расчета кратковременной дозы фликера, вызванной работой дуговой сталеплавильной печи. Методика основана на определении вероятностных характеристик колебаний напряжения по известным характеристикам системы. Она позволяет оценить максимальный уровень колебаний напряжения в точке общего подключения, а также значение кратковременной дозы фликера.

Ключевые слова: качество электрической энергии, дуговые сталеплавильные печи, электроснабжение промышленных предприятий, колебания напряжения, доза фликера.

К числу наиболее распространенных потребителей, негативно влияющих на качество электрической энергии, относятся дуговые сталеплавильные печи (ДСП), эксплуатация которых, как правило, сопровождается нарушением требований к содержанию высших гармоник, степени несимметрии и уровню колебаний напряжения сети [1]. При проектировании систем электроснабжения нередко возникают ситуации, когда требуется оценить возможность подключения бытовых потребителей к шинам, питающим ДСП, однако надежные и простые инженерные методики, позволяющие определить уровень колебаний напряжения и дозу фликера, отсутствуют. Поэтому актуальна их разработка для систем электроснабжения с ДСП. Решение этой задачи позволит осуществлять поиск и оценку технических решений, направленных на снижение негативного влияния ДСП на питающую сеть.

ГОСТ 13109–97 предусматривает два варианта определения дозы фликера: путем измерения с помощью фликерметра и расчетный. Первый вариант применим лишь в процессе работы ДСП, но на этапе проектирования системы электроснабжения его нельзя использовать. Во втором (расчетном) варианте для вычисления кратковременной дозы фликера P_{st} необходимо иметь массив значений времени восприятия фликера:

$$P_{st} = \left(\frac{\sum t_{\phi_i}}{T_{sh}} \right)^{3,2}, \quad (1)$$

где T_{sh} — интервал времени, равный 10 мин; m — число колебаний напряжения за время T_{sh} ;

$$t_{\phi_i} = 2,3(dU_{t_i, пр})^{3,2} \quad (2)$$

— i -е значение времени восприятия фликера на интервале T_{sh} ;

$$dU_{t_i, пр} = F_{пр} dU_{t_i} \quad (3)$$

— i -е значение приведенного размаха изменения напряжения; $F_{пр}$ — коэффициент приведения, зависящий от частоты колебаний напряжения и определяемый в соответствии с приложением к ГОСТ 13109–97; dU_{t_i} — i -е значение размаха изменения напряжения.

Из выражений (1)–(3) видно, что для расчета кратковременной дозы фликера требуется еще и массив значений колебаний напряжения dU_{t_i} на 10-минутном интервале наблюдения T_{sh} , следовательно, первый этап вычисления P_{st} должен включать в себя определение частоты и амплитуды колебаний напряжения, вызванных работой ДСП.

Модуль амплитуды колебаний напряжения вычислим следующим образом:

$$|\Delta U| = \frac{|U_i - U_{ном}|}{U_{ном}} = \frac{|x_c I_i - x_c I_{ном}|}{U_{ном}}, \quad (4)$$

где $U_{ном}$ и $I_{ном}$ — номинальные напряжение, В, и ток, А, сети; x_c — сопротивление системы; I_i — фактическое значение тока, А; U_i — фактическое значение напряжения, В.

Общий множитель в этом выражении назовем коэффициентом связи

$$k_{св} = x_c / U_{ном}. \quad (5)$$

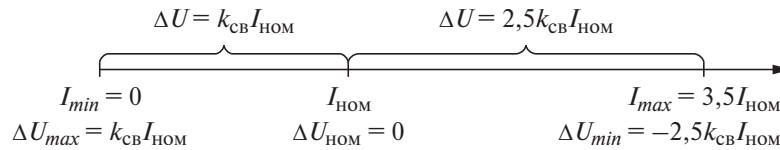


Рис. 1

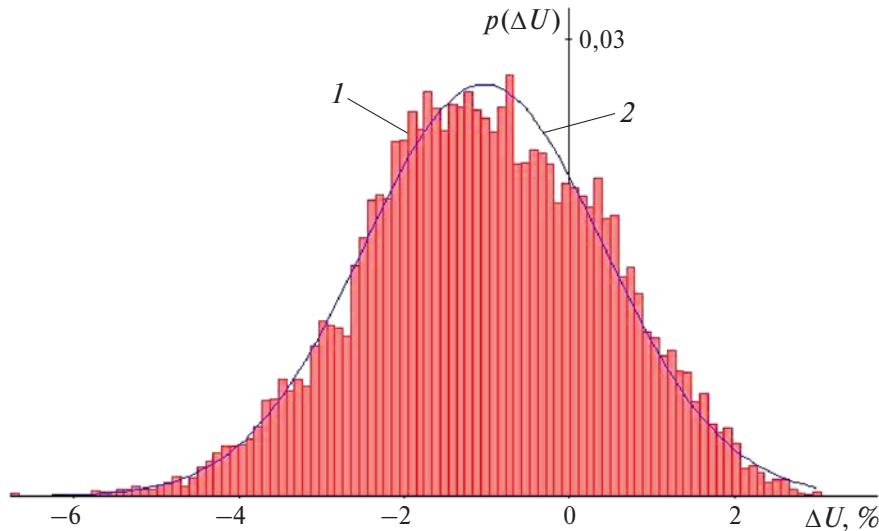


Рис. 2

Примем, что при номинальном токе напряжение на шинах также номинальное. При возрастании тока от $I_{НОМ}$ до I_{max} напряжение на шинах снизится от $U_{НОМ}$ до U_{min} , а при его уменьшении от $I_{НОМ}$ до I_{min} возрастет от $U_{НОМ}$ до U_{max} . При максимальном для ДСП малой мощности токе ($3,5I_{НОМ}$) уровень напряжения на шинах будет минимальным, а при токе, равном 0, — максимальным. Интервалы изменения тока и соответствующих уровней колебаний напряжения представлены на рис. 1. Как видно, колебания напряжения снижаются до минимального значения при достижении током максимума на интервале $2,5k_{св}I_{НОМ}$. Максимального значения они достигнут при изменении тока на интервале $k_{св}I_{НОМ}$ от номинального значения до 0.

Таким образом, минимальное и максимальное значения колебаний напряжения можно определить по формулам:

$$\Delta U_{min} = -2,5k_{св} I_{НОМ}; \quad (6)$$

$$\Delta U_{max} = k_{св} I_{НОМ}. \quad (7)$$

Поскольку колебания напряжения пропорциональны току ДСП, то, как и ток, они должны подчиняться нормальному закону распределения [2].

На рис. 2 представлены гистограмма экспериментальных значений колебаний напряжения I за 10 мин работы ДСП-5 на одном из машиностроительных предприятий Свердловской области и теоретическая кривая 2 распределения для нормального закона.

Примем, что колебания напряжения подчиняются нормальному закону, и определим теоретические параметры плотности их распределения:

математическое ожидание

$$m_{\Delta U} = \frac{\Delta U_{min} + \Delta U_{max}}{2} = \frac{-2,5k_{св} I_{НОМ} + k_{св} I_{НОМ}}{2} = -0,75k_{св} I_{НОМ}; \quad (8)$$

дисперсия

$$\sigma_{\Delta U} = \frac{|\Delta U_{min}| + |\Delta U_{max}|}{6} = \frac{2,5k_{св} I_{НОМ} + k_{св} I_{НОМ}}{6} = 0,583k_{св} I_{НОМ}. \quad (9)$$

Закон распределения колебаний напряжения будет иметь вид:

$$p(\Delta U) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\Delta U}} e^{-\frac{(\Delta U - m_{\Delta U})^2}{2\sigma_{\Delta U}^2}}. \quad (10)$$

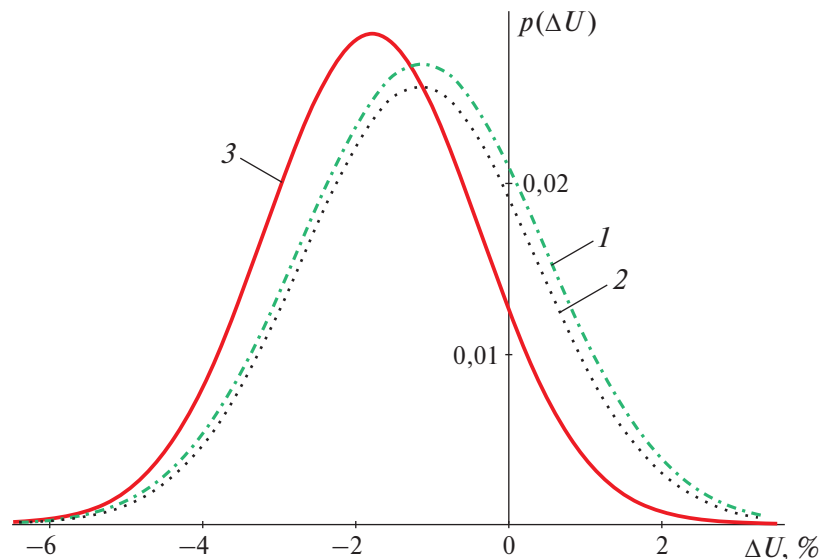


Рис. 3

По выведенным формулам рассчитаем теоретические значения параметров плотности распределения колебаний напряжения для данного предприятия. Исходные данные: $x_c = 1,312$; $U_{\text{НОМ}} = 6300$ В; мощность печного трансформатора $S_{\text{НОМ}} = 1250$ кВ · А.

Номинальный ток ДСП

$$I_{\text{НОМ}} = \frac{S_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3}U_{\text{НОМ}}} = \frac{1250}{\sqrt{3} \cdot 6300} = 114,55 \text{ А.}$$

Максимальный ток ДСП

$$I_{\text{max}} = 3,5I_{\text{НОМ}} = 3,5 \cdot 114,55 = 400,93 \text{ А.}$$

По формулам (5) – (7) найдем: коэффициент связи

$$k_{\text{св}} = 1,312/6300 = 2,08 \cdot 10^{-4};$$

минимальный и максимальный уровни колебаний напряжения:

$$\Delta U_{\text{min}} = -2,5 \cdot 2,08 \cdot 10^{-4} \cdot 114,55 = -5,96 \%;$$

$$\Delta U_{\text{max}} = 2,08 \cdot 10^{-4} \cdot 114,55 = 2,38 \%.$$

Используя полученные данные, по выражениям (8) и (9) рассчитаем значения математического ожидания и дисперсии:

$$m_{\Delta U} = \frac{-5,96 + 2,38}{2} = -1,79 \%;$$

$$\sigma_{\Delta U} = \frac{5,96 + 2,38}{6} = 1,39 \%.$$

Построим кривую распределения колебаний 3, подчиняющихся теоретическому зако-

ну (10), и сравним ее с кривыми 1, 2, полученными экспериментальным путем (рис. 3). Как видно, они хорошо согласуются друг с другом. Смещение математического ожидания в экспериментальных распределениях ближе к нулевому значению объясняется тем, что за 10-минутный интервал наблюдения происходят отключения печи, в результате чего ток снижается до 0 и напряжение на шинах повышается. Кроме того, фактическая максимальная кратность тока печной нагрузки k_I составила 3,4 вместо принятой в расчете согласно указаниям ПУЭ [3] $k_I = 3,5$.

Для расчета кратковременной дозы фликера по выражению (1) необходимо иметь массив данных о времени восприятия фликера (2), который рассчитывают по значениям приведенного размаха изменения напряжения из выражения (3).

Зная закон распределения колебаний напряжения $p(\Delta U)$, можно восстановить соответствующий ему массив исходных данных и определить необходимые значения приведенных размахов изменения напряжения.

Результаты экспериментальных исследований работы дуговых сталеплавильных печей ДСП-5, а также данные [4] свидетельствуют о возникновении колебаний напряжения в диапазоне частот от 0,5 до 15 Гц. Характерная частота регулярных колебаний напряжения, при которой наблюдаются максимальные размахи его изменения и негативное влияние на источники искусственного света, — 10 Гц, что соответствует исходному массиву данных, состоящему из 6000 значений.

Исходный массив значений получают следующим образом:

1) согласно формуле (10) строят график плотности распределения колебаний напряжения;

2) полученный график разбивают на интервалы, количество которых определяют из выражения

$$j = 1 + 3,32 \lg(N), \quad (11)$$

где $N = 6000$ значений;

3) находят ширину каждого интервала:

$$\delta = \frac{\Delta U_{max} - \Delta U_{min}}{j}, \quad (12)$$

4) соответствующее каждому интервалу значение колебаний напряжения вычисляют по формуле

$$\Delta U_j = \Delta U_{min} + \delta j; \quad (13)$$

5) исходя из закона распределения, определяют вероятность попадания значений в каждый из интервалов (начиная с минимального ΔU_{min})

$$P_j = p(\Delta U_j) \delta; \quad (14)$$

6) вычисляют количество значений в каждом интервале:

$$n_j = P_j N. \quad (15)$$

Ниже приведен подробный алгоритм расчета кратковременной дозы фликера на этапе проектирования системы электроснабжения с ДСП малой мощности:

1. По выражениям (8) и (9) находят теоретические параметры плотности распределения колебаний напряжения — математическое ожидание и дисперсию.

2. По полученным параметрам определяют закон распределения колебаний напряжения (10).

3. График плотности разбивают на интервалы, количество j и ширину δ которых рассчитывают по выражению (11) и равенству (12).

4. Для каждого интервала по формуле (13) вычисляют соответствующий уровень колебаний напряжения ΔU_j .

5. Из выражений (14) и (15) определяют количество значений n_j из общего числа N , попавших в заданные интервалы.

6. Зная количество значений в каждом интервале и соответствующий каждому ин-

тервалу уровень колебаний напряжения, находят время восприятия фликера для каждого интервала по формуле, которая с учетом выражений (2) и (3) имеет следующий вид:

$$t_{\phi_j} = 2,3 n_j (F_{пр} |\Delta U_j|)^{3,2}, \quad (16)$$

где $|\Delta U_j|$ — модуль амплитуды колебаний напряжения (амплитуда взята по модулю, так как для расчета уровня фликера важно абсолютное значение отклонения).

7. Подставив полученные по формуле (16) значения времени восприятия фликера в выражение (1), определяют кратковременную дозу фликера.

Пример расчета кратковременной дозы фликера

Расчет выполняется для указанного выше машиностроительного предприятия при тех же исходных (x_c , $U_{ном}$, $S_{ном}$, $I_{ном}$) и расчетных ($k_{св}$, ΔU_{min} , ΔU_{max} , $m_{\Delta U}$, $\sigma_{\Delta U}$) параметрах.

Требуемое количество значений на интервале 10 мин $N = 6000$.

Из выражения (11) вычисляем количество интервалов разбиения: $j = 14$.

Из равенства (12) находим ширину одного интервала:

$$\sigma_j = \frac{2,38 + 5,96}{14} = 0,596 \text{ \%}.$$

В таблице приведены определенные соответственно по формулам (13) — (16) для каждого интервала разбиения: его границы ΔU_j , %; вероятность попадания значения в заданный интервал P_j ; количество значений в каждом j -м интервале n_j ; время восприятия фликера для каждого интервала t_{ϕ_j} .

Из таблицы получаем:

$$\Sigma t_{\phi_j} = 333 \text{ 177 с}.$$

Из выражения (1) определяем кратковременную дозу фликера:

$$P_{st \text{ расч}} = \left(\frac{333177}{600} \right)^{\frac{1}{3,2}} = 7,205.$$

Экспериментальное значение кратковременной дозы фликера на 10-минутном интервале (в период расплавления металла)

$$P_{st \text{ эксп}} = (0,0314 P_{0,1} + 0,0525 P_{1s} + 0,0657 P_{3s} + 0,28 P_{10s} + 0,08 P_{50s})^{1/2} = 6,916.$$

j	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$\Delta U_j, \%$	-5,96	-5,37	-4,77	-4,18	-3,58	-2,98	-2,39	-1,79	-1,19	-0,6	0	0,6	1,19	1,79	2,39
$P_j, \%$	0,19	0,63	1,72	3,93	7,48	11,8	15,6	17,1	15,6	11,8	7,48	3,93	1,72	0,63	0,19
n_j	11	38	103	236	449	710	936	1026	936	710	449	236	103	38	11
$t_{\phi_j} \cdot 10^3, \text{с}$	9290	21 882	41 223	61 449	71 364	63 026	40 650	17 748	4423	365	0	121	488	651	495

Результат аналогичных вычислений еще за один произвольный 10-минутный интервал работы ДСП-5 в период расплавления металла:

$$P_{st \text{ эксп}} = (0,0314 P_{0,1} + 0,0525 P_{1,5} + 0,0657 P_{3,5} + 0,28 P_{10,5} + 0,08 P_{50,5})^{1/2} = 7,399.$$

Усредненное экспериментальное значение уровня фликера

$$P_{st \text{ ср}} = \frac{6,916 + 7,399}{2} = 7,157.$$

Максимальная погрешность расчета, %:

$$\delta = \left| \frac{P_{st \text{ эксп}} - P_{st \text{ расч}}}{P_{st \text{ эксп}}} \right| \cdot 100 = \left| \frac{6,916 - 7,205}{6,916} \right| \cdot 100 = 4,2.$$

Как видно, экспериментальное и теоретическое значения кратковременной дозы фликера очень хорошо согласуются друг с другом.

Выводы

1. Разработанная методика расчета максимального уровня колебаний напряжения и кратковременной дозы фликера, вызванных

работой дуговых сталеплавильных печей, основана на определении вероятностных характеристик колебаний напряжения по известным характеристикам системы.

2. Предложенная методика определения кратковременной дозы фликера P_{st} может применяться в инженерных расчетах на этапе проектирования системы электроснабжения с ДСП. Полученные при ее использовании результаты обладают достаточной для принятия технических решений точностью.

Список литературы

1. **Особенности** моделирования дуговой сталеплавильной печи как электротехнического комплекса / Г. П. Корнилов, А. А. Николаев, Т. Р. Храмшин и др. — Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова, 2013, № 1.
2. **Волков Л. Т., Новосёлов Н. А.** Новая методика расчета коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения в сетях с дуговыми сталеплавильными печами. — Промышленная энергетика, 2009, № 1.
3. **Правила** устройства электроустановок. 7-е изд. — М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2007.
4. **Черненко А. Н.** Разработка методики расчета высших гармоник тока и напряжения дуговых электропечей в точке общего присоединения: Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. М., 2011.

alexniko@inbox.ru

ВНИМАНИЮ ПОДПИСЧИКОВ!

Редакция информирует о подписке на I полугодие 2014 г.

Подписные данные о журнале опубликованы в объединенном каталоге "Пресса России".

Индекс — 70734.