

## Метод последовательных приближений в решении задач аналитического описания численных данных

К.Е. Лисицкий

Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия  
lisitskiyke@gmail.com

Статья поступила 16.10.2017, принята 21.10.2017

*Электроприемники с резкопеременным режимом работы вызывают колебания напряжения в электрической сети, которые обуславливают возникновение изменяющегося светового потока искусственных источников света, воспринимаемого человеком как фликер. При снижении напряжения питания яркость свечения лампы накаливания также снижается, при увеличении — увеличивается. Изменения яркости лампы при систематических перепадах питающего напряжения негативно сказываются на самочувствии человека, вызывая сильное утомление. Оценка колебаний напряжения в действующей электрической сети выполняется по моделируемому с помощью фликерметров уровню фликера. Моделирование уровня фликера осуществляется в соответствии с нормализованной частотной характеристикой прибора (НЧХП). В действующем стандарте эта характеристика представлена в табличной форме, что затрудняет ее использование при анализе колебаний напряжения во всем спектре частот восприятия фликера. Кроме того, достоверная оценки фликера и уровня колебаний напряжения в электрической сети усложняется тем, что в действующем стандарте параметры НЧХП представлены только для ламп накаливания мощностью 60 Вт, тогда как в настоящее время широко используются искусственные источники света с различной чувствительностью к колебаниям напряжения. При одинаковых колебаниях напряжения в электрической сети у этих ламп возникает разный по уровню фликер, который не учитывается стандартными методами. Разность между реальными уровнями фликера ламп различных типов и уровнем фликера, моделируемым стандартными методами, является методической погрешностью, которая служит причиной недостоверной оценки фликера и выбора неэффективных мероприятий по его нормализации. В статье предложена методика аналитического описания стандартной НЧХП и НЧХП искусственных источников света с разной чувствительностью к колебаниям напряжения в электрической сети.*

**Ключевые слова:** нормализованная частотная характеристика прибора; аппроксимация; погрешность.

## The method of successive approximations in solving problems of analytical description of numerical data

K.E. Lisitskiy

Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia  
lisitskiyke@gmail.com

Received 16.10.2017, accepted 21.10.2017

*Electric receivers with an abruptly operating mode cause voltage fluctuations in the electrical network, which lead to the emergence of a changing light flux of artificial light sources perceived by a person as a flicker. When the voltage of the incandescent lamp decreases, the brightness of its glow decreases, and when the supply voltage increases, it increases. With a systematic change in the supply voltage, changes in the brightness of the lamp affect the person negatively causing excessive fatigue. Estimation of the voltage fluctuations in the operating electrical network is performed according to the flicker-level model designed with the help of flicker meters. The simulation of the level of the flicker is carried out in accordance with the normalized frequency response of the instrument (NFRI). In the current standard, this characteristic is presented in tabular form, which makes it difficult to use this form when analyzing voltage fluctuations in the entire spectrum of flicker perception frequencies. In addition, a reliable estimate of the flicker and the level of voltage fluctuations in the electrical network is complicated by the fact that in the current standard, the NCPF parameters are only for 60 W incandescent lamps. And nowadays artificial light sources with a different sensitivity to voltage fluctuations are widely used. With the same voltage fluctuations in the electrical network, these flickers develop a flicker, different in level, which is not taken into account by standard methods. The difference between the real levels of the flicker of lamps of different types and the level of the flicker modeled by standard methods is a methodical error that causes an inaccurate estimate of the flicker and the selection of inefficient measures for its normalization. In the article the technique of the analytical description of standard NFRI and NFRI of artificial light sources with different sensitivity to fluctuations of a voltage in an electric network is offered.*

**Keywords:** normalized frequency response of device; approximation; error.

### Введение

Электрическая нагрузка, характеризующаяся резко-переменным режимом, вызывает в электрической сети колебания напряжения, которые приводят к появлению колебаний светового потока искусственных источников света, воспринимаемых человеком как фликер [1–5].

Обеспечение электромагнитной совместимости искусственных источников света с электрической сетью выполняется при соответствии нормам качества электрической энергии уровней колебаний напряжения. В соответствии с действующими нормами уровни колебаний напряжения в электрической сети оцениваются по значениям двух показателей качества электрической энергии [5]: кратковременной дозы фликера  $P_{st}$  и длительной дозы фликера  $P_{lt}$ . Причем  $P_{st}$  — мера восприятия фликера, которая оценивается в течение 10 мин, а  $P_{lt}$  — в течение 2 ч по последовательным значениям  $P_{st}$  [5]. Основным способом определения  $P_{st}$  и  $P_{lt}$  является использование фликерметров. Фликерметр — это измерительный прибор, моделирующий реакцию на колебания напряжения в электрической сети системы «лампа накаливания мощностью 60 Вт – глаз человека – мозг человека». Фактические колебания светового потока применяемых источников света и фактические уровни фликера при этом не учитываются [6–13]. Данная проблема обостряется тем, что в настоящее время широко используются искусственные источники света с отличающейся от ламп накаливания мощностью 60 Вт чувствительностью к колебаниям напряжения в электрической сети. У таких источников света при одинаковых колебаниях напряжения наблюдаются разные уровни фликера, которые методами, приведенными в действующем стандарте [14], не учитываются. Данное положение обуславливает методическую погрешность таких методов.

Испытания фликерметров проводят по методике, представленной в стандарте [13]. В соответствии с этой методикой на выходе блока 4 фликерметра при колебаниях напряжения, параметры которых соответствуют нормализованной частотной характеристике прибора (НЧХП), должно формироваться мгновенное значение фликера  $P_{inst} = 1$  о.е. Стандартная методика не учитывает, что в случае использования ламп с отличающейся от

ламп накаливания мощностью 60 Вт к колебаниям напряжения должно формироваться другое по величине мгновенное значение фликера  $P_{inst} \neq 1$  о.е. Это обуславливает методическую погрешность при оценке фликера различных источников света [15, 16].

Данные, полученные с помощью фликерметров, могут считаться достоверными только в том случае, если используемые НЧХП соответствуют чувствительности к колебаниям напряжения применяемых источников света.

Стандартная модель фликерметра может быть усовершенствована путем введения блока поправки (рис. 1). Реализация блока поправки требует предварительных исследований в соответствии с методикой расчета НЧХП, представленной в [16]. Данный подход позволяет выполнять достоверную оценку фликера в реальном времени.

В соответствии с чувствительностью к колебаниям напряжения применяемых источников света блок поправки осуществляет корректировку мгновенных значений фликера  $P_{inst}$ , умножая их на поправочный коэффициент  $p(f_{кн})$ . Величина поправочного коэффициента рассчитывается в реальном времени на срезе одной частоты  $f_{кн}$  как отношение амплитуды относительных изменений напряжения НЧХП для применяемых источников света  $d_l(f_{кн})$  и амплитуды относительных изменений напряжения  $d_{лн}(f_{кн})$  стандартной НЧХП [6]:

$$p(f_{кн}) = \frac{d_l(f_{кн})}{d_{лн}(f_{кн})}. \quad (1)$$

НЧХП для применяемых источников света предварительно определяются по методике расчета [16, 17].

Блок 5 структурной модели фликерметра осуществляет статистический анализ в соответствии с требованиями [13].

Практическая реализация рассчитанных НЧХП затрудняется в связи с тем, что они являются массивом чисел ( $f_{кнi}$ ,  $d_i$ ).

На рис. 2 изображены стандартная НЧХП и параметры повторяющихся колебаний напряжения в электрической сети.

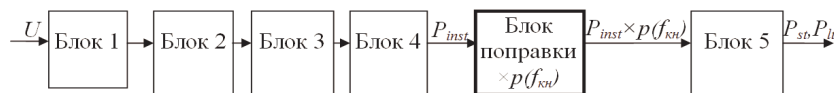


Рис. 1. Усовершенствованная модель фликерметра



Рис. 2. НЧХП и параметры повторяющихся колебаний напряжения в электрической сети

На рис. 2 видно, что определение соответствия колебаний напряжения в электрической сети параметрам НЧХП затруднено:  $f_{кнi}$ ,  $f_{кнi+1}$  и  $d_i$ ,  $d_{i+1}$ .

Для решения этой задачи необходимо аналитическое описание всех рассчитанных НЧХП.

**Методика последовательных приближений.** Аналитическое описание НЧХП ламп с разной чувствительностью к колебаниям напряжения может быть выполнено с помощью функционального средства Basic Fitting прикладного пакета программ MatLab в соответствии с методикой, включающей в себя в последовательное выполнение следующих процедур:

1. Аппроксимация к НЧХП полиномом с асимптотическим графиком,  $d(f_{кн})$ .

Асимптотический график наблюдается у полинома следующего вида:

$$d(f_{кн}) = \frac{A}{(B + f_{кн})^2 + C}, \quad (2)$$

где  $A$ ,  $B$ ,  $C$  — коэффициенты полинома.

Выражение (2) удобно для применения в микроконтроллере, поскольку использует простейшие математические действия.

2. Расчет погрешности аппроксимации кривой НЧХП,  $e_i(f_{кн})$ :

$$e_i(f_{кн}) = d(f_{кн}) - d_i(f_{кн}), \quad (3)$$

где  $d(f_{кн})$  — амплитуда относительных изменений напряжения исходной НЧХП, %;  $d_i(f_{кн})$  — амплитуда относительных изменений напряжения, восстановленная по результатам  $i$ -й аппроксимации, %.

3. Аппроксимация к  $e_i(f_{кн})$  полиномом вида (2).

4. Расчет погрешности последующей аппроксимации,  $e_{i+1}(f_{кн})$ :

$$e_{i+1}(f_{кн}) = e_i(f_{кн}) - d_{i+1}(f_{кн}). \quad (4)$$

5. Проверка точности аналитического описания НЧХП.

Величина погрешности последующей аппроксимации,  $e_{i+1}(f_{кн})$ , проверяется по условию:

$$e_{i+1}(f_{кн}) < 0,5\%. \quad (5)$$

Процедуры 3 и 4 осуществляются до выполнения условия (5).

6. Описание исходной НЧХП суммой полученных полиномов:

$$d_{\Sigma}(f_{кн}) = \sum_{i=1}^N \frac{A_i}{(B_i + f_{кн})^2 + C_i}, \quad (6)$$

где  $N$  — количество полиномов.

Количество полиномов, аналитически описывающих исходную НЧХП, определяется необходимой точностью приближения. Высокая точность аппроксимации требует большого количества полиномов.

Величина погрешности аппроксимации к НЧХП задавалась произвольно. Для примера она составила 0,5 %.

В табл. 1 представлены коэффициенты полиномов, описывающих стандартную НЧХП. На рис. 3 изображен алгоритм методики последовательных приближений, на рис. 4 — графическое изображение аналитического описания стандартной НЧХП, на рис. 5 — графическое изображение результатов аналитического описания стандартной НЧХП

Таблица 1

Коэффициенты полиномов, описывающих стандартную НЧХП

№ полинома	$A$ , %·Гц <sup>2</sup>	$B$ , Гц	$C$ , Гц <sup>2</sup>
1	412	-79,47	-1380
2	52,09	-31,54	71,29
3	10,41	3,156	14,39
4	1,755	-38,23	1,753
5	1,519	-21,66	16,82
6	-0,8355	-9,166	9,882
7	0,04625	-4,116	1,332
8	0,07382	-32,86	1,053
9	-0,251	-20,91	4,603
10	0,04107	-4,109	1,208
11	0,008823	-23,91	0,2371
12	-0,005121	-30,5	0,2015
13	-0,03092	-12,46	2,114
14	-0,01872	-19,08	1,478
15	-0,005699	-7,021	0,6865
16	0,003	-9,3	0,6865
17	0,0008	-21	0,068
18	0,004	-1	0,6
19	0,0008	-5	0,2
20	-0,0011	-22	0,1

Относительная погрешность аналитического описания НЧХП определена по выражению:

$$E = \left| \frac{d - d_{\Sigma}}{d} \right| \cdot 100\%. \quad (7)$$

На рис. 5 видно, что погрешность аналитического описания стандартной НЧХП не превысила 0,5 %.

Методика последовательных приближений была использована для аналитического описания НЧХП для ламп с разной чувствительностью к колебаниям напряжения.

Для аналитического описания с заданной точностью стандартной НЧХП и НЧХП люминесцентной, компактной люминесцентной лампы требуется не менее 20, индукционной лампы — 14, светодиодной лампы — 8-ми полиномов.

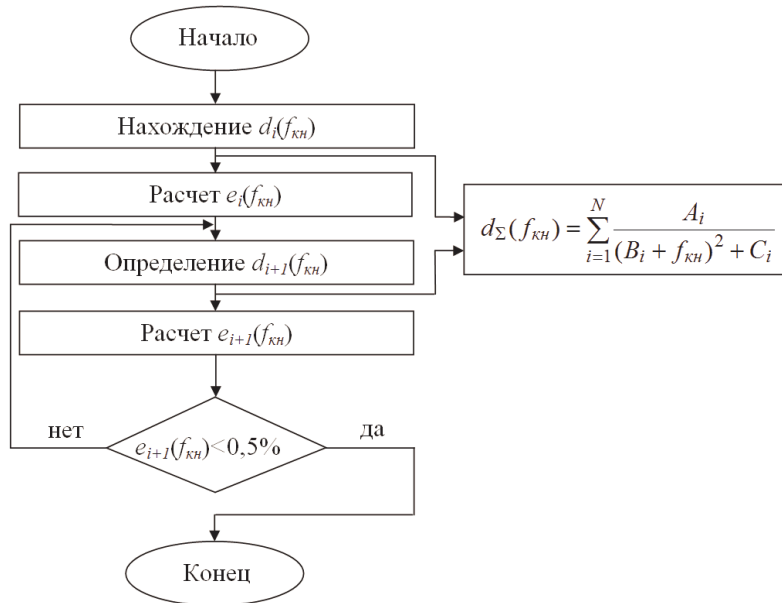


Рис. 3. Алгоритм методики последовательных приближений

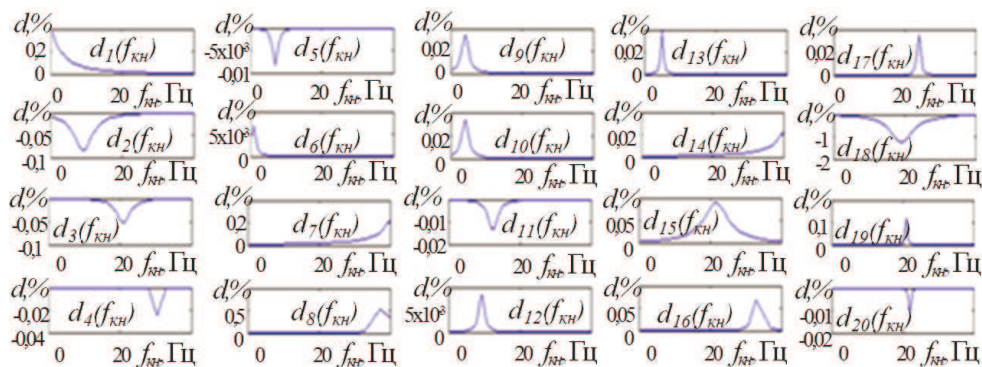


Рис. 4. Графическое изображение аналитического описания стандартной НЧХП

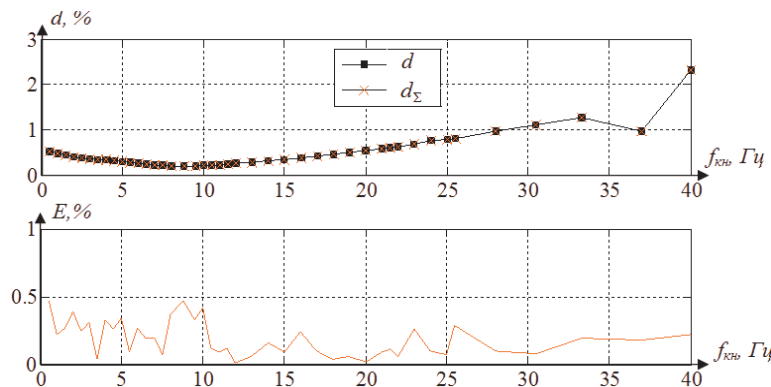


Рис. 5. Графическое изображение результатов аналитического описания стандартной НЧХП

**Заключение**

По результатам оценки погрешности аналитического описания можно сделать вывод о том, что представленная в статье методика может быть использована для аналитического описания численных данных с любой необходимой точностью.

*Литература*

1. Шидловский А.К., Борисов Б.П., Вагин Г.Я., Курный Э.Г., Крахмалин И.Г. Электромагнитная совместимость электроприёмников промышленных предприятий. Киев: Наукова думка, 1992. 236 с.
2. Лисицкий К.Е., Струмяляк А.В. Анализ проблемы колебаний напряжения в электрических сетях // Материалы регион. науч.-технической конф. «Энергетике региона». Братск, 2010. 265 с.

3. Rashbass C. The visibility of transient changes of luminance // *The Journal of Physiology*. 1970. № 210. P.165–186.
4. Mirra C., Sanni G. Il fenomeno del flicker. Analisi delle sue caratteristiche. *Technishe di misura e metodi dilimitazione // L' Elletrotechnica*. 1987. P. 805–822.
5. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: ГОСТ 32144-2013. М.: Стандартинформ, 2014.
6. IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems: IEEE Std 519-1992. New York.: Published by the IEEE, 1993.
7. Caldara S., Nuccio S., Spataro C. A virtual instrument for measurement of flicker // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Oct.1998. Vol. 47, № 45. P. 1155–1158.
8. Rong C. Cobben J.F.C., Myrzik J.M.A., Blom J.H., Kling W.L. Flickermeter used for different types of lamp // 9th International Conference of electrical power quality and Utilization (EPQU'2007), Barcelona. 2007. Spain, 9–11 October. P. 1–6.
9. Gomez J.C., Morcos M.M. Flicker Measurement and Light Effect // *IEEE Power Engineering Review*, Nov. 2002. Vol. 22, № 11. P. 11–15.
10. Bertola A., Lazaroiu G.C., Roscia M., Zaninelli D. A Matlab Simulink flickermeter model for power quality studies // in Proc. 11th Int. Conf. Harmonics Quality Power, 2004. P.734–738.
11. Лисицкий К.Е., Струмеляк А.В. Аппаратное решение проблемы оценки дозы фликера источников света // *Материалы X (XXXII) Всерос. науч.-технической конф. Братск*, 2011. С.64–65.
12. Лисицкий К.Е., Струмеляк А.В. Аппаратное решение проблемы определения передаточных функций искусственных источников света при оценке дозы фликера // *Труды Братского государственного университета. Сер. Естественные и инженерные науки*. 2011. Т. 2. С. 31–35.
13. Совместимость технических средств электромагнитная. Фликерметр. Функциональные и конструктивные требования: ГОСТ 51317.4.15 – 2012. М.: Стандартинформ, 2014.
14. Совместимость технических средств электромагнитная. Ограничение изменений напряжения, колебаний напряжения и фликера в низковольтных системах электроснабжения общего назначения. Технические средства с потребляемым током не более 16 А (в одной фазе), подключаемые к электрической сети при несоблюдении определенных условий подключения. Нормы и методы испытаний: ГОСТ 30804.3.3–2013. М.: Стандартинформ, 2014.
15. Лисицкий К.Е., Струмеляк А.В., Никифоров К.С. Выбор мероприятий для снижения фликера и оценка их эффективности // *Управление качеством энергии: сб. тр. Междунар. науч.-практической конф. М.: ООО «Центр полиграф. услуг «Радуга»*, 2014. С.123–128.
16. Лисицкий К.Е., Струмеляк А.В. Усовершенствование стандартной модели фликерметра для оценки дозы фликера в сетях общего назначения // *Технологии ЭМС*. 2014. № 1 (48). С. 11–16.
17. Лисицкий К.Е. Совершенствование метода оценки фликера // *Системные исследования в энергетике: тр. молодых ученых ИСЭМ СО РАН*. 2014. Вып. 44. С. 50–55.
- receivers of industrial enterprises. Kiev: Naukova dumka, 1992. 236 p.
2. Lisitskii K.E., Strumelyak A.V. Analysis of the problem of voltage fluctuations in electric networks // *Materialy region. nauch.-tekhnicheskoi konf. «Energetike regiona»*. Bratsk, 2010. 265 p.
3. Rashbass C. The visibility of transient changes of luminance // *The Journal of Physiology*. 1970. № 210. P. 165-186.
4. Mirra C., Sanni G. Il fenomeno del flicker. Analisi delle sue caratteristiche. *Technishe di misura e metodi dilimitazione // L' Elletrotechnica*. 1987. P. 805-822.
5. Norms of quality of electric energy in general-purpose power supply systems: GOST 32144-2013. M.: Standartinform, 2014.
6. IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems: IEEE Std 519-1992. New York.: Published by the IEEE, 1993.
7. Caldara S., Nuccio S., Spataro C. A virtual instrument for measurement of flicker // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Oct.1998. Vol. 47, № 45. P. 1155-1158.
8. Rong C. Cobben J.F.C., Myrzik J.M.A., Blom J.H., Kling W.L. Flickermeter used for different types of lamp // 9th International Conference of electrical power quality and Utilization (EPQU'2007), Barcelona. 2007. Spain, 9-11 October. P. 1-6.
9. Gomez J.C., Morcos M.M. Flicker Measurement and Light Effect // *IEEE Power Engineering Review*, Nov. 2002. Vol. 22, № 11. P. 11-15.
10. Bertola A., Lazaroiu G.C., Roscia M., Zaninelli D.A. Matlab Simulink flickermeter model for power quality studies // in Proc. 11th Int. Conf. Harmonics Quality Power, 2004. P. 734-738.
11. Lisitskii K.E., Strumelyak A.V. A hardware solution to the problem of estimating the dose of flicker of light sources // *Materialy X (XXXII) Vseros. nauch.-tekhnicheskoi konf. Bratsk*, 2011. P. 64-65.
12. Lisitskii K.E., Strumelyak A.V. Hardware solution of the problem of determining the transfer functions of artificial light sources in estimating the dose of flicker // *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Estestvennye i inzhenernye nauki*. 2011. T. 2. P. 31-35.
13. Compatibility of technical means is electromagnetic. Flickermeter. Functional and structural requirements: GOST 51317.4.15 - 2012. M.: Standartinform, 2014.
14. The compatibility of technical means is electromagnetic. Limitation of voltage variations, voltage fluctuations and flicker in low-voltage general-purpose power supply systems. Technical means with a current consumption of not more than 16 A (in one phase), connected to the electrical network if the specified connection conditions are not observed. Norms and test methods: GOST 30804.3.3-2013. M.: Standartinform, 2014.
15. Lisitskii K.E., Strumelyak A.V., Nikiforov K.S. Selection of measures to reduce flicker and evaluate their effectiveness // *Upravlenie kachestvom energii: sb. tr. Mezhdunar. nauch.-prakticheskoi konf. M.: ООО «Tsentr poligraf. uslug «Raduga»*, 2014. P. 123-128.
16. Lisitskii K.E., Strumelyak A.V. Improvement of the standard model of a flickermeter for estimating the dose of flicker in general-purpose networks // *Technology of electromagnetic compatibility*. 2014. № 1 (48). P. 11-16.
17. Lisitskii K.E. Perfection of the method of flicker estimation // *Sistemnye issledovaniya v energetike: tr. molodykh uchenykh ISEM SO RAN*. 2014. Vyp. 44. P. 50-55.

#### References

1. Shidlovskii A.K., Borisov B.P., Vagin G.Ya., Kurenyi E.G., Krakhmalin I.G. Electromagnetic compatibility of electric