

# ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КОЛЕБАНИЙ НАПРЯЖЕНИЯ НА ЭЛЕКТРОМАГНИТНУЮ СОВМЕСТИМОСТЬ ПРИ ПЕРИОДИЧЕСКОМ ИЗМЕНЕНИИ НАПРЯЖЕНИЯ

Мельник В.Н., Куренный Э.Г.

ДонНТУ

Кафедра Электроснабжения промышленных предприятий и городов

[VTL119@ukr.net](mailto:VTL119@ukr.net)

## **Abstract**

*Melnic V.N., Kurenniy E.G. Estimation of influence of fluctuations of a voltage on electromagnetic at periodical change of a voltage. In article the new approach is examined at definition of a doze of flicker voltage both at designing, and in real conditions. Calculation of a doze of flicker pays off on the computer with use of the specialized program in which the filter flickermetr is simulated. At such approach it was possible to avoid complex mathematical calculations. On an input simulated of flickermetr it is possible to submit fluctuations of the any form.*

Развитие систем электроснабжения и появление мощных электроприёмников с резкопеременным графиком нагрузки привело к необходимости установления норм, разработки методов измерения и расчетов колебаний напряжения.

В нормальных условиях в сети распределения электроэнергии возникают быстрые колебания напряжения, вызываемые подключением и отключением различных нагрузок. Кроме того существует такое оборудование, потребляющие электроэнергию (как например дуговые печи), где электрический ток расходуется неравномерно, его расход меняется в зависимости от этапов рабочего цикла.

Подобные нагрузки приводят к возникновению повторяющихся во времени изменений питающего напряжения, называемых “флюктуациями напряжения”. Вполне естественно, что на практике эти флюктуации стараются ограничить, удерживая их в таких пределах, чтобы не создавать неудобств для пользователей электрической энергией. На рисунке 1 схематически представлены примеры флюктуаций напряжения.

Прибор, потребляющий электроэнергию и наиболее чувствительный к флюктуациям питающего напряжения, - это лампа накаливания, и не потому, что подобные флюктуации вызывают в ней необратимую порчу или какое-либо повреждение, а потому, что в силу

флюктуаций питающего напряжения в этой лампе возникают колебания силы света, которые могут причинять неудобства тому, кто пользуется электрическим освещением.

Что же такое “фликер”? “Фликер” по-английски означает “мигание” и определяется как субъективное ощущение флюктуаций освещенности.

Поскольку фликер – это восприятие человеческим мозгом световых флюктуаций, осуществляемое через посредство физиологических механизмов зрения, то ясно, что для того, чтобы охарактеризовать подобное субъективное восприятие, необходимо не только исследовать поведение человеческого глаза с целью определения его реакции на световые раздражители, но приступить также к испытаниям на людях, проводимым с применением статистических методов.

Будучи субъективным, фликер представляет собой явление, меняющиеся от индивида к индивиду, причем не только в отношении силы ощущения, но также и в том, что касается степени испытываемого неудобства.

В процессе исследований, направленных на получение адекватной модели системы “глаз-мозг” с целью охарактеризовать восприятие световых флюктуаций, было необходимо учитывать следующие аспекты:

1. Каков порог восприятия световых флюктуаций определенной формы при фиксированной частоте их повторения?

2. В случае фиксированной формы флюктуаций как меняется порог их восприятия в зависимости от частоты?

3. Человек может замечать также и спорадические изменения освещения, которые могут раздражать его, мешать ему; как охарактеризовать физиологическую реакцию на раздражители подобного типа?

4. Можно ли свести ощущение, вызываемое нерегулярными флюктуациями освещения, к ощущению, вызываемому его периодическими флюктуациями, например синусоидальными или прямоугольными, так чтобы создать измерительный прибор и проградуировать его независимо от изменения во времени и продолжительности флюктуаций?

И действительно, результаты исследований, проведенных на людях, показали, что человеческое зрение представляет собой сложную систему, которая зависит не только от характеристик самого глаза, но также и от мозговых механизмов восприятия, на которые оказывает влияние та степень внимания, которую субъект, подвергающийся эксперименту, обращает на исследуемое явление.

Например, субъект, совершенно не подозревающий о возможности существования флюктуаций освещения, как правило, оказывается менее чувствительным к их

возникновению, чем ранее предупрежденный наблюдатель, который ждет появления подобных флюктуаций.

Результат работ, проведенных специалистами по физиологии, показали, что человеческий глаз характеризуется избирательной реакцией по отношению к частоте периодических световых флюктуаций с максимальной чувствительностью примерно на частоте 9 Гц, а также что степень восприятия светового раздражения прямо пропорциональна квадрату амплитуды этих флюктуаций.

Кроме того, существует еще эффект накопления в памяти. В силу этого эффекта происходит следующее: если два следующих одно за другим колебания освещенности слишком близко во времени, то для человеческого глаза невозможно воспринять их по отдельности: они воспринимаются человеком как одно единственное колебание.

И наконец, в пределах разумного приближения, ощущение фликера зависит от относительной амплитуды колебания по сравнению с существовавшей до этого освещенностью, если учесть механизмы адаптации человеческого глаза (например, регулировку диаметра зрачка) к освещенности окружающей среды.

Положение вещей еще больше осложняется, если перейти от анализа восприятия к анализу помехи или степени неудобства, которое вызывает колеблющееся освещение у субъекта, подверженного его воздействию. Действительно, уже одна только интуиция подсказывает, что то дело, которым занимается субъект, представляет собой факторы первостепенного значения для определения его реакции. Например, человек, который читает или во всяком случае совершает какие-то операции, требующие особой сосредоточенности, где зрение играет превеликую роль, вне всякого сомнения будет испытывать большее неудобство, чем те люди, которые должны просто перемещаться в каком-то помещении, не обращая особого внимания на характеристики этого помещения.

Поскольку для разработки международного фликерметра нужно было выбрать какую-то определенную модель зрительного восприятия, то поэтому возникла необходимость обратиться к исследованиям в области физиологии, которые позволили бы прийти к не слишком сложному решению и одновременно с этим использовать опыт, накопленный во Франции, Германии и Англии, где уже были разработаны в национальном масштабе как фликерметры, так и методы определения резкости фликера.

Таким путем были разработаны утонченные модели, оказавшиеся, однако, слишком сложными для того, чтобы использовать их для создания прибора, предназначенного для постоянного применения в работе.

Рашбасс разработал новую модель, основываясь на эксперименте, задуманном в совершенно ином духе. Он использовал колебания освещенности, имеющие форму

импульсов, как положительных, так и отрицательных по отношению к средней освещенности окружающего пространства, и получил основополагающие результаты:

1. продолжительность возбуждения, возникающего в восприятии, значительно превышает продолжительность того изменения освещенности, имеющего форму импульса, которое вызывает это возбуждение (импульсы, слишком близкие во времени, не воспринимаются по-отдельности);

2. знак изменения освещенности (в сторону увеличения или уменьшения) не оказывает никакого влияния на чувствительность восприятия ;

3. если два следующих один за другим импульса имеют амплитуды соответственно А и В, то такая же степень ощущения достигается в случае последовательности В,А;

4. связь ощущения с амплитудой возбуждения – квадратичного типа.

На основании этих результатов была разработана модель фликерметра, однако с двумя изменениями:

- кривая, представляющая реакцию человеческого глаза в зависимости от частоты, была получена как наилучшая интерполяция кривых, построенных во Франции и в Германии в ходе экспериментах на людях, проводившихся в сопоставимых (т. е. в достаточно однородных ) условиях и более показательных с точки зрения практического использования освещения, чем эксперименты Ланджа;

- постоянная времени фильтра нижних частот была выбрана равной 300 мс.

В настоящее время международный фликерметр представляет собой довольно сложную систему - рисунок 1. Он состоит из:

- блока выравнивателя напряжения – чтобы получить величину относительного изменения питающего напряжения  $\Delta V/V$ , избегая выполнения операции деления;

- блока демодулятора – который вычитает флюктуацию напряжения из “несущей”, представленной средней величиной напряжения на частоте 50 Гц;

- блок взвешивающий фильтр – представляющий собой фильтр для которого была выбрана характеристика, полученная как наилучшее приближение из характеристик, принятых для французского и немецкого фликерметров. В этом фильтре максимум чувствительности восприятия для синусоидальных флюктуаций имеет место на частоте 8,8 Гц;

- блок возведения в квадрат и амортизации – в этом блоке установлена схема, которая связана с фильтром нижних частот первого порядка, с постоянной времени 0,3 с.

Результаты измерения фликера выражаются в “на единицу”; при этом равным единице считается такой выходной сигнал, который дает прибор, когда на его входе имеет

место флюктуация, соответствующая порогу восприятия. Таким образом, уровень фликера – это число, которое показывает, на сколько выше ( или ниже ) порога восприятия находится соответствующее зрительное возбуждение.

Однако степень мгновенного ощущения фликера еще не дает информации, касающейся его допустимых пределов; чтобы определить связь между изменением мгновенного ощущения фликера и связанным с ним неудобством, раздражением, называемым “степенью резкости фликера” и обозначаемым символом  $P_{st}$ , необходим дальнейший анализ. В качестве опорного интервала был выбран десятиминутный промежуток времени.

Обратимся к современным методам оценки фликера. Универсальным объективным показателем допустимости колебаний есть доза фликера  $P_{ST}$  напряжения [1 – 3]. В действующих электрических сетях доза измеряется фликерметром, а в проектировании – расчетным путем. В [1] рекомендуются приближенные методы расчета лишь для частных случаев детерминированных колебаний прямоугольной и треугольной формы – к тому же с существенными ограничениями интервалов времени между соседними колебаниями. Разработка общего метода без ограничения по виду колебаний является целью статьи. Идентичность результатов расчета любого показателя электромагнитной совместимости (ЭМС) обеспечивается, если измерительный прибор и методы расчета используют единую математическую модель ЭМС. Для определенности далее рассматривается принятая в [2] и [3] математическая фликер-модель системы лампа – глаз – мозг. Исходными данными являются реализации (графики) процессов  $U(t)$  изменения во времени  $t$  действующих значений напряжения или их характеристики. Будем рассматривать периодические, детерминированные непериодические и стационарные случайные процессы. В последнем случае задаются корреляционные функции (КФ)  $K(\tau)$ . Обобщение результатов на нестационарные случайные процессы не вызывает затруднений.

**Математическая модель.** Фликер-модель состоит из трех блоков: входного БВ, взвешивающего фильтра ФВ, квадратичного инерционного сглаживания КС и статистической обработки ОС (рис.1). Первый блок выделяет помеху ЭМС  $X(t)$ : разность между процессом  $U(t)$  и его одноминутным трендом. Помеха измеряется в процентах от уровня номинального напряжения  $U_n$ .

Рис. 1. Структурная схема фликер-модели

Второй блок моделирует лампу накаливания (60 Вт, 230 В) и зрительную систему человека. Он включает в себя три линейных фильтра: 1 – верхних частот с частотой среза 0,05 Гц, 2 – Баттерворта шестого порядка с частотой среза 35 Гц и 3 – фильтр восприятия. С учетом данных [2 – 4] передаточные функции фильтров запишем в виде:

$$W_1(p) = \frac{T_p p}{T_p p + 1}$$

$$W_3(p) = \frac{k T_2 p (T_5 p + 1)}{(T_2^2 p^2 + T_1 p + 1) (T_3 p + 1) (T_4 p + 1)}$$

$$W_2(p) = \frac{1}{(T_{B2}^2 p^2 + T_{B1} p + 1) (T_{B2}^2 p^2 + T_{B3} p + 1) (T_{B2}^2 p^2 + T_{B4} p + 1)}$$

$$W(p) = W_1(p) W_2(p) W_3(p)$$

В последнем блоке на графике  $S(t)$  проводятся различные уровни фликера  $P_r$  и строится функция  $E_r(P_r)$  кумулятивных вероятностей  $E_r$ , выражаемых в процентах. Вероятность связана с функцией распределения  $F(S)$  ощущений фликера соотношением

$$E_r(P_r) = 100 [1 - F(S)] \Big|_{S=P_r}$$

По значениям  $E_r = 0,1; 1; 3; 10$  и  $50$  % находятся соответствующие уровни фликера  $P_r = \text{arc } E_r(P_r)$

Доза фликера (в [2] – уровень резкости фликера) определяется по формуле

$$P_{ST} = \sqrt{0,0314 P_{0,1} + 0,0525 P_1 + 0,0657 P_3 + 0,28 P_{10} + 0,08 P_{50}}$$

Допустимое значение дозы равно единице.

Первоначально доза фликера вычислялась методом парциальных реакций с использованием математического приложения – MATLAB. Было предложено воспользоваться ресурсами самого MATLAB при определении дозы фликера, а именно смоделировать фильтр фликерметра “лампа – глаз - мозг”. Для решения данной задачи была задействована часть MATLAB – simulink, которая предназначена для моделирования

практически любых процессов. Имея в своем распоряжении передаточную функцию фильтра фликерметра, которая рассматривалась выше:

$$W(p) = W_1(p)W_2(p)W_3(p)$$

можно было создать его модель.

Передаточная функция была разложена на 7 блоков, соединенных последовательно между собой. Каждый блок представлял собой черный ящик, имеющий вход и выход, для которого можно было задать передаточную функцию (Transfer Fcn). Далее после фильтра был включен квадратор ( $U^2$ ) и фильтр нижних частот первого порядка с постоянной времени равной 300 мс (Transfer Fcn7). С выхода этого фильтра результат поступал на блок, который преобразовывал данные, поступающие на его вход в вектор (To workspace), который можно было в последствии обработать программно в редакторе MATLAB. Схема фильтра представлена на рис. 1.

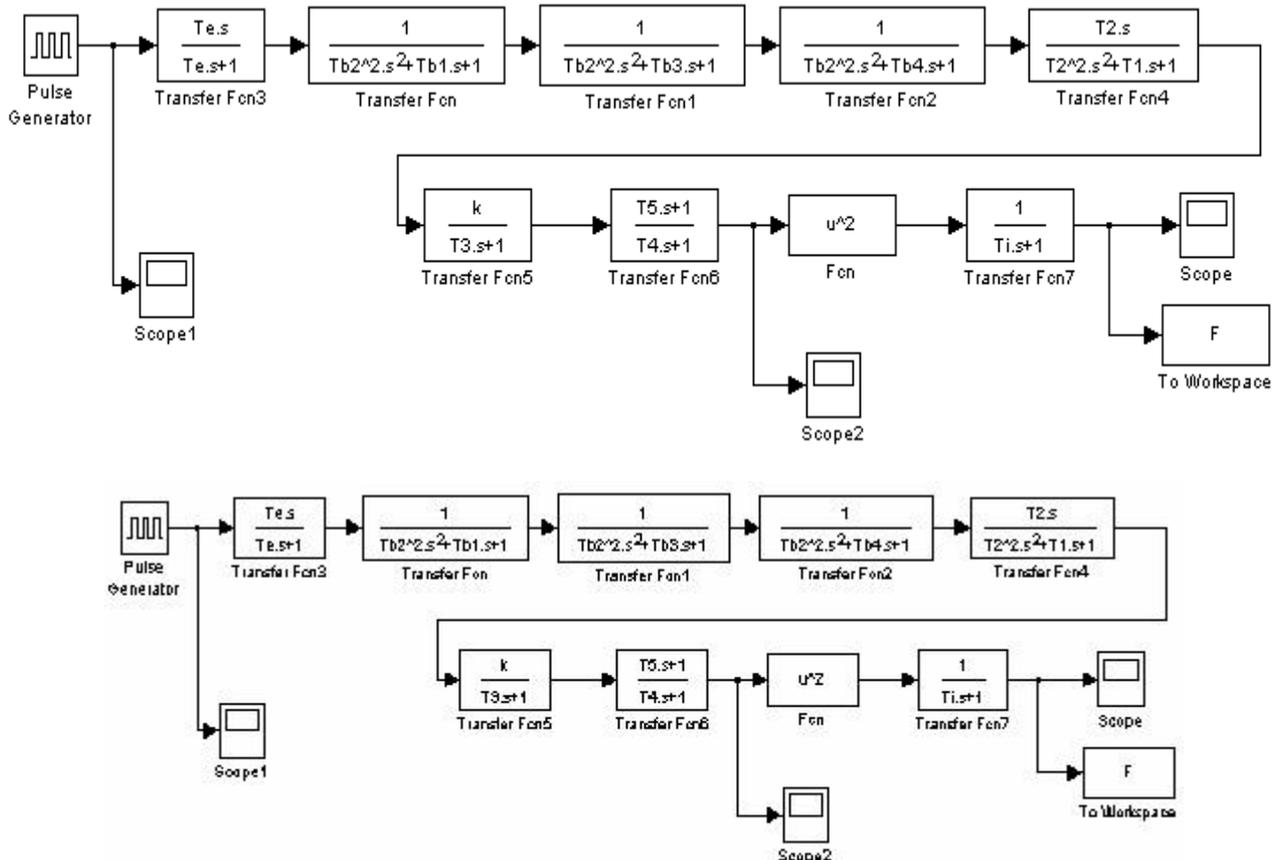


Рисунок 1 – Модель фильтра фликерметра.

Далее требуется построить функцию  $E_\gamma(P_\gamma)$  кумулятивных вероятностей  $E_\gamma$  выражаемых в процентах. По значениям  $E_\gamma = 0,1; 1; 3; 10$  и  $50\%$  найти соответствующие уровни фликера. А затем определить дозу фликера по формуле:

$$P_{ST} = \sqrt{0,0314 P_{0,1} + 0,0525 P_1 + 0,0657 P_3 + 0,28 P_{10} + 0,08 P_{50}}$$

Все вышеперечисленные действия начиная от нахождения функции кумулятивных вероятностей до определения дозы фликера осуществляется программно.

Удобством данной модели является то, что на вход фильтра можно подавать практически любые колебания напряжения (периодические, случайные, любой формы), и при этом на выходе получать реакцию, а затем обрабатывать.

При периодических воздействиях в программе было предусмотрено отслеживание установившегося процесса на выходе фильтра и отсечение переходного процесса. Отслеживание производилось путем сравнения с заданной точностью значений реакции на выходе фильтра в начале и в конце периода колебаний.

Задачей созданной модели является построение зависимостей допустимых размахов колебаний напряжения  $\delta U$ , выраженного в процентах от действующего от частоты  $f$ , выраженной в герцах для различных форм колебаний, коэффициентов включений.

Ниже приведена таблица допустимых значений колебаний напряжения в зависимости от частоты следования, имеющих форму меандра и синусоиды, полученных данной моделью и для сравнения приведены значения полученные международным фликерметром.

Таблица 1- Допустимые значения колебаний напряжения в функции от частоты, имеющих форму меандра и синусоиды, для разработанной модели – Model и МЭК

прямоугольник				синусои			
и				да			
F, Гц	IEC: 1997	Model	dP,%	F, Гц	IEC: 1997	Model	dP, %
0,5	0,514	0,5503	7,062257	0,5	2,34	2,342	0,08547
1	0,471	0,4857	3,121019	1	1,432	1,3902	2,918994
2	0,401	0,4018	0,199501	2	0,882	0,8661	1,802721
3	0,355	0,3516	0,957746	3	0,654	0,6336	3,119266
4	0,333	0,3288	1,261261	4	0,5	0,4875	2,5
5	0,293	0,2877	1,808874	5	0,398	0,3875	2,638191
6	0,249	0,2447	1,726908	6	0,328	0,3186	2,865854
7	0,217	0,2129	1,889401	7	0,28	0,2739	2,178571
8	0,201	0,1953	2,835821	8	0,256	0,25	2,34375
8,8	0,199	0,1915	3,768844	8,8	0,25	0,2444	2,24
10	0,205	0,2	2,439024	10	0,26	0,2547	2,038462
11	0,223	0,2173	2,556054	11	0,282	0,2764	1,985816
12	0,246	0,2411	1,99187	12	0,312	0,3065	1,762821
13	0,275	0,2696	1,963636	13	0,348	0,3427	1,522989
14	0,308	0,3015	2,11039	14	0,388	0,3833	1,21134
15	0,344	0,3358	2,383721	15	0,432	0,4247	1,689815
16	0,376	0,3726	0,904255	16	0,48	0,4741	1,229167
17	0,413	0,4113	0,411622	17	0,53	0,5236	1,207547
18	0,452	0,4518	0,044248	18	0,584	0,5755	1,455479
19	0,498	0,4944	0,722892	19	0,64	0,63	1,5625
20	0,546	0,5319	2,582418	20	0,7	0,6873	1,814286
21	0,586	0,5857	0,051195	21	0,76	0,7463	1,802632
22	0,604	0,6343	5,016556	22	0,824	0,8081	1,929612
23	0,68	0,6851	0,75	23	0,89	0,873	1,910112
24	0,743	0,7385	0,605653	24	0,962	0,9412	2,162162
среднее dP			1,966607	среднее dP			1,919102

Из приведенной таблицы видно, что полученные при использовании модели результаты отличаются от МЭК в среднем не более чем на 2%. На рисунке 4 приведена графический вариант таблицы для синусоидальной формы, на рисунке 5 – для формы в виде меандра. Это подтверждает правильность разработанной модели фликерметра относительно международно и позволяет произвести дальнейший анализ определения дозы фликера для других колебаний.

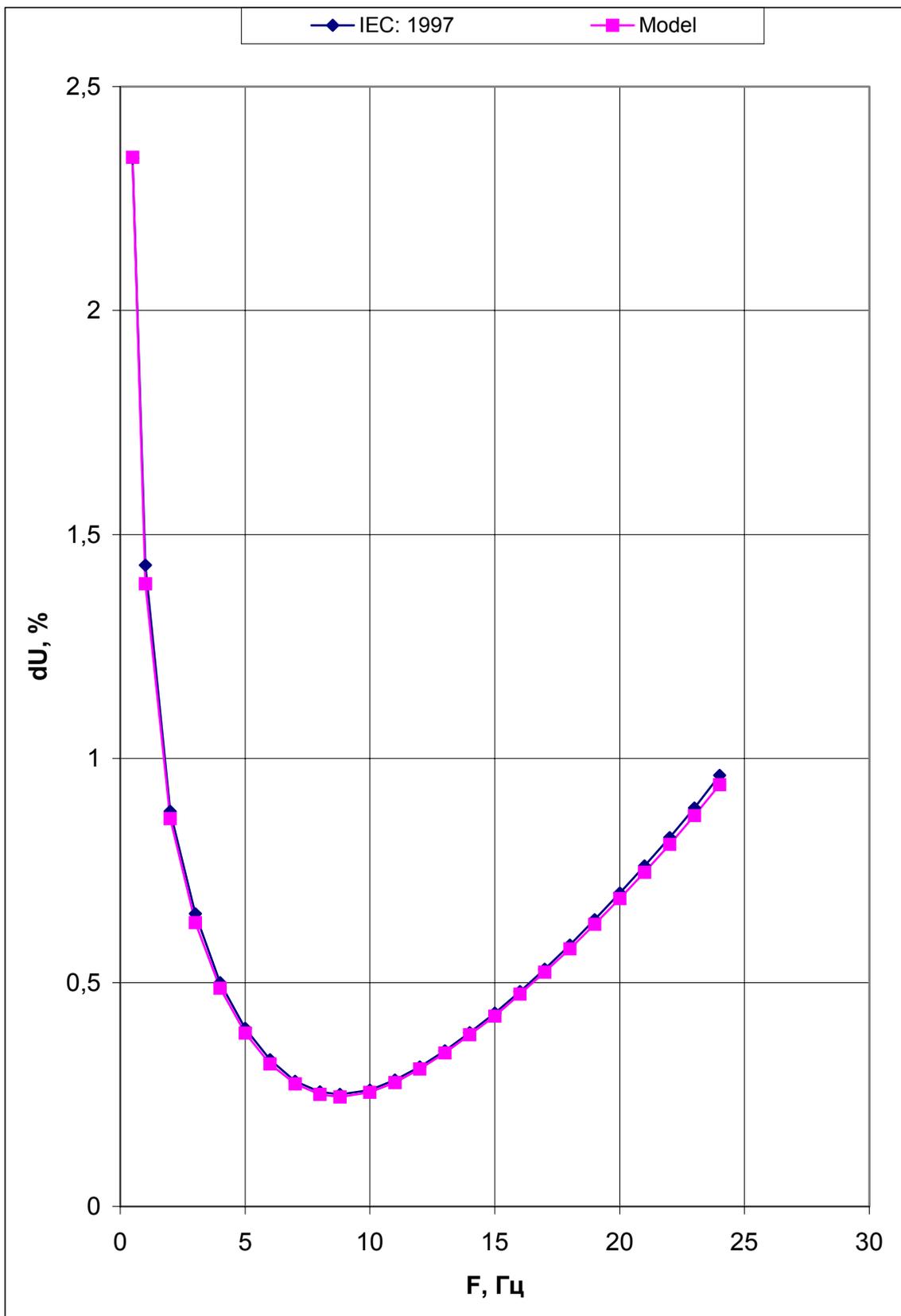


Рисунок 4 – Зависимость допустимых колебаний напряжения от частоты для колебаний синусоидальной формы

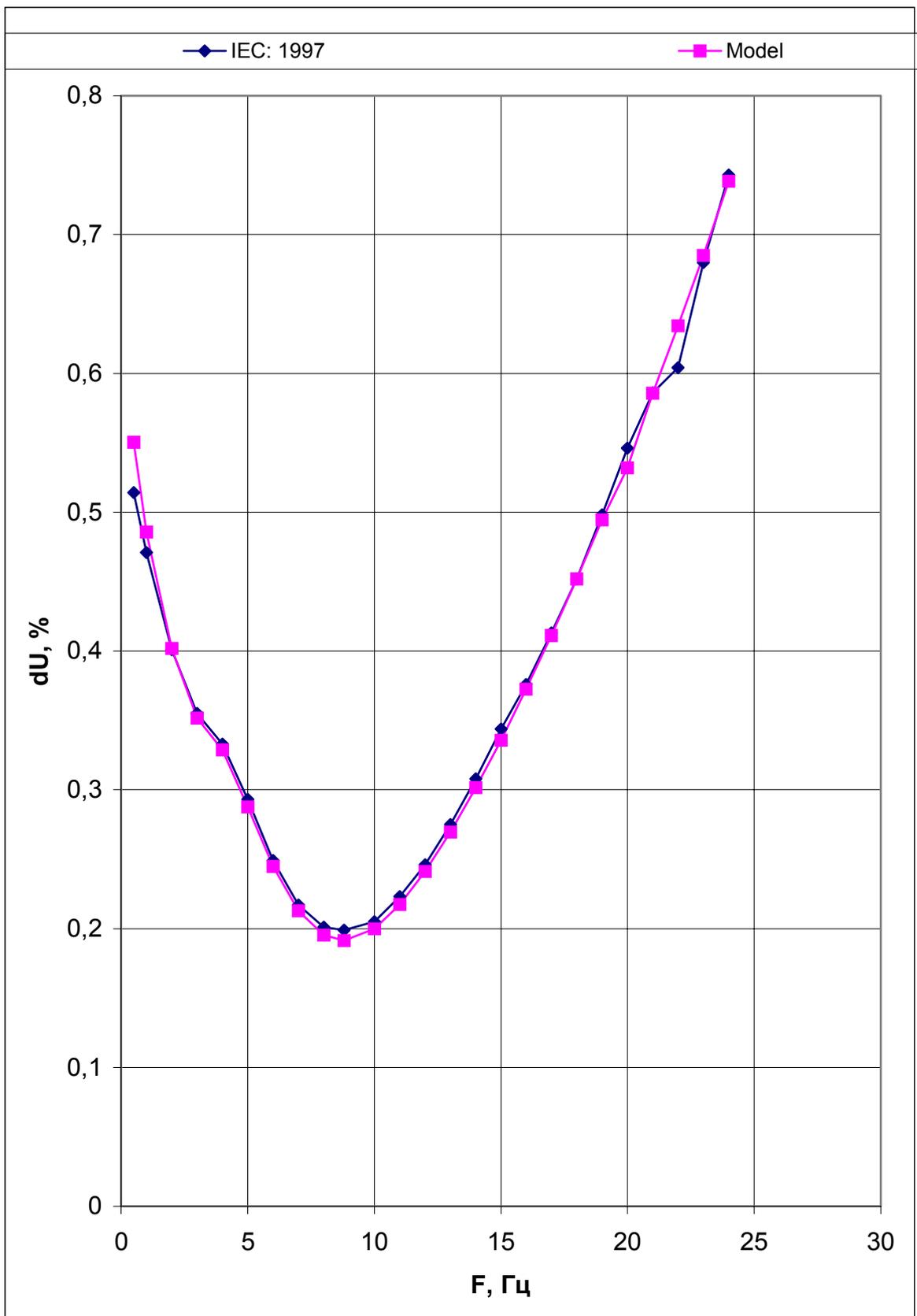


Рисунок 5 – Зависимость допустимых колебаний напряжения от частоты для колебаний формы в виде меандра.

## ***Литература***

1. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. в Украине 01.01.2000.
2. Mirra C., Sani G. Il fenomeno del flicker. Analisi delle sue caratteristiche. Tecniche di misura e metodi di limitazione. – L'Elettrotecnica. – 1987. – P. 805 – 822.
3. Курінний Е.Г., Чернікова Л.В., Петросов В.А. Уніфікований метод розрахунку характеристик випадкових процесів у лінійних фільтрах моделей електромагнітної сумісності // Технічна електродинаміка / Тематичний випуск “Проблеми сучасної електротехніки -2000”, ч. 2. – 2000 – С. 20 – 23.