
УДК 004.02:621:628.9

В. М. Ковальчук

ОЦЕНКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ПО ДОЗЕ ФЛИКЕРА

UDC 004.02:621:628.9

V. M. Kovalchuk

ESTIMATION OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY BY THE DOSE OF FLICKER

Аннотация

Существующие методы оценки электромагнитной совместимости по дозе фликера базируются на мере ощущения неустойчивого зрительного восприятия, вызванного лампой накаливания, яркость которой изменяется во времени и измеряется специальным прибором – фликерметром. Показано, что фликерметр, структура которого основана на чисто эмпирическом подходе к моделированию системы «колебания напряжения на зажимах лампы накаливания – мера зрительного ощущения», превышает требования к электромагнитной совместимости. Предлагается отказаться от квадратора на выходе взвешивающего фильтра фликерметра и за дозу фликера принимать меру, выраженную в долях порога заметности колебаний напряжения на зажимах ламп, динамические и статические характеристики которых зависят от их типа.

Ключевые слова:

электромагнитная совместимость, фликерметр, доза фликера, светлота, модель «источник света – зрительный анализатор».

Abstract

The existing methods for assessing electromagnetic compatibility by the dose of flicker are based on a measure of sensation of unstable visual perception caused by an incandescent lamp, the brightness of which changes over time and is measured by a special device called a flickermeter. It is shown that the flickermeter, whose structure is based on a purely empirical approach to modeling 'voltage fluctuations at the terminals of an incandescent lamp being a measure of visual sensation' system, significantly overestimates the requirements for electromagnetic compatibility. It is proposed that the quadrator be not used at the output of the flickermeter's weighting filter and, as the dose of flicker, the measure be taken which is expressed in fractions of the threshold of noticeability of voltage fluctuations at the terminals of lamps, the dynamic and static characteristics of which depend on their type.

Keywords:

electromagnetic compatibility, flickermeter, flicker dose, brightness, light source – visual analyzer model.

Введение

Под электромагнитной совместимостью понимается [14] возможность нормальной работы электроприемников в электрических сетях без нарушения показателей качества электрической энергии. Известно, что электроприемники с резко переменной нагрузкой (дуговые сталеплавильные печи, электро-

сварочное оборудование, прокатные станы и т. п.) вызывают в электрических сетях колебания напряжения или фликер (мерцание) светового потока электрических источников света, что приводит к нежелательным физиологическим и психическим реакциям работающих в условиях электрического освещения. Именно поэтому в отечественных и зарубежных стандартах на качество элек-

трической энергии всегда применяют показатели допустимых колебаний напряжения на зажимах осветительных приборов. Например, в отечественных стандартах до 1989 г. на качество электроэнергии использовался показатель в виде графика кривой допустимых размахов колебаний напряжения типа меандр от частоты их появления.

В современных стандартах [3, 4] используется более универсальный показатель – доза фликера, который применим для оценки как периодических, так и случайных колебаний напряжения.

Основная часть

Под дозой фликера согласно [3] понимается мера ощущения неустойчивого зрительного восприятия, вызванного световым источником, яркость которого изменяется во времени и измеряется специальным прибором – фликерметром. Основу фликерметра [3] составляет взвешивающий фильтр (рис. 1) с передаточной функцией, $F(s)$ моделирующий отклик зрительной системы человека на колебания напряжения в диапазоне частот $f = 0,5 \dots 25$ Гц, подаваемых на газонаполненную электрическую лампу с биспиральной нитью накаливания (60 Вт, 230 В и/или 60 Вт,

120 В), как наиболее распространённую и восприимчивую к колебаниям напряжения источником света:

$$F(s) = \frac{K \omega_1 s}{s^2 + 2Ls + \omega_1^2} \frac{1 + \frac{s}{\omega_2}}{\left(1 + \frac{s}{\omega_3}\right) \left(1 + \frac{s}{\omega_4}\right)},$$

где s – комплексный оператор Лапласа; $K = 1,74802$; $L = 2\pi 4,05981 \text{ с}^{-1}$; $\omega_1 = 2\pi 9,16494 \text{ с}^{-1}$; $\omega_2 = 2\pi 2,27979 \text{ с}^{-1}$; $\omega_3 = 2\pi 1,22535 \text{ с}^{-1}$; $\omega_4 = 2\pi 21,9 \text{ с}^{-1}$.

На выходе взвешивающего фильтра стоит блок квадратичной обработки сигналом с фильтром низкой частоты первого порядка с постоянной времени 0,3 с. Взвешивающий фильтр и блок квадратичной обработки сигналом с фильтром низкой частоты [3] являются моделью восприятия фликера системой «лампа – глаз – мозг человека» при подаче колебаний напряжения на эталонную лампу и выполняют две функции:

- 1) возводят в квадрат значения взвешенного сигнала фликера, моделируя нелинейность характеристик восприятия цепи «глаз – мозг»;
- 2) сглаживают сигнал, моделируя эффект накопления в памяти мозга.

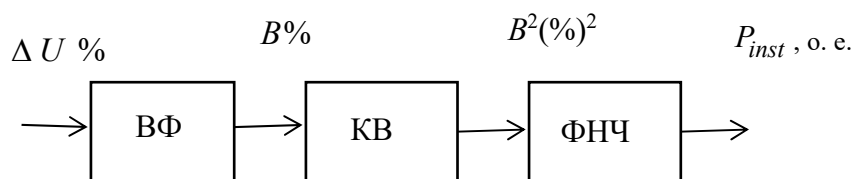


Рис. 1. Структурная схема фликерметра [3]: ВФ – взвешивающий фильтр; КВ – квадратор; ФНЧ – фильтр низкой частоты первого порядка с постоянной времени 0,3 с

Сигнал на выходе блока квадратичной обработки сигналом с фильтром низкой частоты обозначается как мгновенное значение фликера P_{inst} , единичное значение которого принимается за порог восприимчивости фликера человеком. Затем в режиме реального вре-

мени производится процедура статистической обработки P_{inst} , которая позволяет на интервале наблюдения 10 мин определить кратковременную дозу фликера P_{st} .

Статистический анализ основан на разбиении амплитуды сигнала, характе-

ризирующего мгновенное значение фликера, на определенное число классов. Каждый раз, когда уровень фликера достигает определенного значения, счетчик соответствующего класса добавляет единицу к имеющемуся числу. Таким образом, определяется функция частотного распределения значений P_{inst} . При выборе достаточно высокой частоты опроса получают в конце интервала измерения окончательный результат анализа, который представляет собой распределение длительностей уровней фликера в каждом классе.

Суммируя показания счетчиков всех классов и выражая показание счетчика каждого класса по отношению к общей сумме, получают функцию плотности вероятности уровня фликера. Из этой функции получают интегральную функцию вероятности, применяемую при осуществлении статистического анализа «время – уровень фликера».

С использованием интегральной

$$P_{st} = \sqrt{0,0314P_{0,1} + 0,0525P_{1S} + 0,0657P_{3S} + 0,28P_{10S} + 0,08P_{50S}}, \quad (1)$$

где перцентили $P_{0,1}$, P_{1S} , P_{3S} , P_{10S} , P_{50S} – уровни фликера, значения которых были превышены, в течение 0,1 %, 1 %, 3 %, 10 % и 50 % времени за интервал наблюдения $T_{short} = 10$ мин.

Индексы s в формуле указывают на сглаженные значения P_1 , P_3 , P_{10} , P_{50} , которые рассчитывают по следующим формулам:

$$P_{50S} = (P_{30} + P_{50} + P_{80})/3;$$

$$P_{10S} = (P_6 + P_8 + P_{10} + P_{13} + P_{17})/5;$$

$$P_{3S} = (P_{2,2} + P_3 + P_4)/3;$$

$$P_{1S} = (P_{0,7} + P_1 + P_{1,5})/3.$$

Интервал наблюдения 10 мин, применяемый при оценке кратковре-

функции вероятности могут быть получены основные статистические характеристики фликера, такие как среднее значение, стандартное отклонение, уровень фликера, превышаемый в заданной части интервала наблюдения (в процентах), и относительное время, в течение которого уровень фликера превышает заданное значение.

При проведении статистического анализа в реальном времени сразу после получения результатов на кратковременном интервале (значение кратковременной дозы фликера) начинается анализ следующего временного интервала наблюдения, и результаты предыдущего интервала поступают на выход фликерметра.

Измерение на интервале наблюдения 10 мин позволяет определить кратковременную дозу фликера P_{st} , значение которой вычисляется по следующей эмпирической формуле:

менной дозы фликера P_{st} , удобен для оценки колебаний напряжения, создаваемых техническими средствами с коротким рабочим циклом.

В случаях, когда необходимо учитывать суммарный эффект нескольких нагрузок, создающих помехи случайным образом (например, сварочных аппаратов, электродвигателей), или принимать во внимание источники фликера с длительным и меняющимся рабочим циклом (например, дуговые электрические печи), следует оценивать длительную дозу фликера P_{lt} . Для этого длительную дозу фликера P_{lt} определяют на основе измерений кратковременных доз фликера P_{st} применительно к периоду наблюдения, связанному с длительным рабочим циклом нагрузки или периодом, в течение которого наблюдатель может воспринимать фликер,

например, двух часов, используя выражение

$$P_{it} = \sqrt[3]{\frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} P_{sti}^3},$$

где P_{sti} ($i=1,2,\dots,12$) – последовательные значения кратковременной дозы фликера.

Как следует из [3, табл. 4], для получения ординат кратковременной дозы фликера P_{st} , о. е., вводится пропорциональное звено с коэффициентом передачи $k_Y^2 = 1/256(\%)^2$ (на рис. 1 это звено не показано). Поэтому передаточные функции взвешивающего фильтра и блока квадратичной обработки сигналом с фильтром низкой частоты при испытаниях фликерметра обеспечивают на выходе прибора одинаковые значения:

– мгновенной дозы фликера $P_{inst} = 1$ при подаче на вход колебаний напряжения типа меандр или синусоиды с размахом и частотой согласно [3, табл. 1 и 2];

– кратковременной дозы фликера $P_{st} = 1$ при подаче на вход колебаний напряжения типа меандр с размахом и частотой [3, табл. 5].

Для решения практических задач электромагнитной совместимости по дозе фликера используются методы непосредственного измерения, аналитические и моделирования [5–9, 14]. Наибольшие трудности встречаются при использовании аналитических методов. Точное вычисление реакции взвешивающего фильтра и блока квадратичной обработки сигналом с фильтром низкой частоты фликерметра (т. е. дозы фликера) на колебания напряжения, отличающиеся от синусоидальной формы, приводит к громоздким выражениям.

При использовании метода частичных реакций [7] процесс на выходе взвешивающего фильтра представляется суммой 11-ти слагаемых, а после

возведения в квадрат число слагаемых возрастает в 6 раз. Более громоздкие выражения получаются при использовании рядов Фурье для разложения процесса на входе фликерметра. Метод [5], основанный на эмпирических формулах и графиках, не подтвержден точными методами.

Существенное усложнение аналитических расчетов вызывают и процедуры статистического взвешивания по формуле (1), и среднее кубическое усреднение кратковременных доз фликера P_{sti} , которые не имеют достаточного физического обоснования.

Широкое применение новых энергоэффективных источников света, таких как светодиодных и малогабаритных люминесцентных, вызвали справедливое сомнение [9] в использовании фликерметра [3] для оценки электромагнитной совместимости сети и таких ламп. Однако по данным [9] все обычные люминесцентные лампы оказались более восприимчивы к фликеру, чем лампы накаливания, что явно противоречит известным данным [2, 11].

Аналитические расчеты доз фликера показали [7], что испытательные и калибровочные сигналы, используемые для проверки функционирования фликерметра [3], выдают результат, существенно отличающийся от кривых допустимых размахов колебаний напряжения.

Эти недостатки фликерметра, по мнению автора, обусловлены:

– объединением во взвешивающем фильтре моделей двух объектов (лампа и зрительная система), структура и параметры которых определяются кибернетическим методом «черного ящика», по выходному логическому сигналу (заметно или незаметно), не имеющему количественной метрики;

– использованием в блоке квадратичной обработки сигналом с фильтром низкой частоты способа моделирования нелинейных преобразований и эффекта накопления в системе «зрение – мозг», который не подтвержден физиологиче-

скими исследованиями и по существу уже учтен во взвешивающем фильтре как модели всей системы зрения.

Для решения указанных проблем в первую очередь необходимо воспользоваться имеющимися подходами в моделировании зрительной системы [1, 12, 13]. В [1, 13] на основе кибернетического подхода была создана функциональная математическая модель зрения, описывающая статические и динамические процессы преобразования яркости зрительной картины в светлоту (степень ощущения) человека. Зрение, как любая система (биологическая или техническая), обладает инерционностью и адаптацией на входное воздействие, что делает связь между яркостью и ощущением нелинейной и динамичной.

В [12] был использован структурно-функциональный подход к созданию модели зрительного анализатора, структура которой повторяет анатомическое строение зрительного анализатора, начиная с моделей фоторецепторов сетчатки и заканчивая моделью нейронов коры головного мозга. При имитационном моделировании определялся временной интервал зрительного слияния двух отдельных световых импульсов надпороговой величины длительностью 0,2 с. Результаты моделирования хорошо совпали с натурными испытаниями. Однако непосредственное применение этой модели для оценки электромагнитной совместимости нецелесообразно из-за ее сложности и отсутствия объективной метрики показателя воздействия фликера.

В середине 1980-х гг. в Донецком политехническом институте, с участием автора и под руководством проф. Э. Г. Куренного, был разработан первый отечественный фликерметр [6, 14], структура которого практически повторена в [3].

Основные принципиальные отличия между этими фликерметрами следующие.

1. Взвешивающий фильтр фли-

керметра [6, 14] представляет собой функциональную модель системы «источник света – зрительная система», состоящую из модели лампы, представленной отдельным инерционным звеном первого порядка, с коэффициентом передачи λ и постоянной времени T_i , числовые значения которых зависят от типа источника света. Модель восприятия фликера воспроизводит инерционные и адаптационные процессы в зрительной системе аналогично [13] с передаточной функцией $F(s)$:

$$F(s) = \frac{\lambda \cdot \lg(e) \cdot s}{(T_i \cdot s + 1)(T_i \cdot s + 1)} \times \left(\frac{T_{a1}}{T_{a1} \cdot s + 1} + \frac{k \cdot T_{a2}}{T_{a2} \cdot s + 1} \right),$$

где s – комплексный оператор Лапласа; T_i – постоянная инерции восприятия фликера, принятая равной 0,016 с; T_{a1} и T_{a2} – постоянные адаптационных процессов, равные 0,016 и 70 с соответственно; $k = 0,09$.

Такой взвешивающий фильтр фликерметра [6, 14] оценивает воздействие фликера в более широком диапазоне от 0,001 до 25 Гц, что делает оценку электромагнитной совместимости более достоверной, поскольку фликер с частотой ниже 0,5 Гц также имеет отрицательное воздействие.

2. В значении постоянной времени низкочастотного фильтра блока квадратичной обработки сигналом с фильтром низкой частоты (4,4 мин против 0,3 с). Такой фильтр воспроизводит, установленный автором [6] экспериментально, эффект кумуляции отрицательного воздействия фликера на зрительную систему и человека в целом, объективно проявляющейся через $\theta = 3 \cdot 4,4 \approx 10$ мин. Как показано в [8], сигнал на выходе этого фильтра эквивалентен кратковременной дозе фликера P_{st} .

Однако наличие в фликерметре [6, 14] блока квадратичной обработки на выходе взвешивающего фильтра недостаточно обосновано, поскольку до настоящего времени не существует однозначной и объективной метрики степени отрицательного воздействия (не восприятия) фликера на человека.

На основе опыта этих работ предлагаются следующие направления совершенствования фликерметра [3].

Разделить взвешивающий фильтр на два блока: модель источника света и модель восприятия фликера. Статические и динамические параметры модели ламп определить на основе эксперимента. Для упрощения структуры фликерметра и аналитических методов оценки электромагнитной совместимости при современных источниках света достаточно, как показано в [6, 7], учитывать только различие в статических параметрах ламп через поправочные коэффициенты λ .

Исключить из блока квадратичной обработки сигналом с фильтром низкой частоты квадратор, поскольку квадратичное соотношение между яркостью L и степенью ее восприятия зрением экспериментально не подтверждается и отсутствует в известных моделях [1, 12, 13]. Нелинейное преобразование яркости в светлоту B принято выражать через закон Вебера – Фехнера [1, 10]:

$$B - B_0 = \frac{1}{\varepsilon} \ln \frac{L}{L_{II}},$$

где B – светлота, измеренная в порогах $\varepsilon = \Delta L/L$; L_{II} – пороговая яркость, где светлота B_0 принимает значение 1.

Показано [10], что закон Вебера – Фехнера применим в диапазоне дневного освещения, когда порог ε постоянен и равен 0,007...0,008 о. е.

Включение процедуры логарифмирования во фликерметр необязательно. При небольшом диапазоне колебаний яркости ΔL от базовой L_0 логарифмирование можно заменить коэф-

фициентом $1/(\varepsilon \cdot L_0)$.

Для выполнения условия линеаризации логарифмического преобразования, примем за базовую номинальную яркость $L_N = L_0$ при номинальном напряжении на зажимах лампы. Тогда преобразования изменения яркости ΔL относительно номинального значения L_N в светлоту ΔB примет вид:

$$\Delta B = \frac{1}{\varepsilon} \cdot \frac{\Delta L}{L_N}.$$

Из этого уравнения видно, что заметное изменение ощущения ($\Delta B > 1$) произойдет, если относительные изменения яркости ΔL лампы и, соответственно, напряжения ΔU на ее зажимах от номинальных значений превысят порог ε :

$$\frac{\Delta L}{L_N} > \varepsilon; \quad \frac{\Delta U}{U_N} > \frac{\varepsilon}{\lambda}.$$

Для ламп накаливания при $\lambda \approx 3,6$ [14] пороговое изменение напряжения от номинального на ее зажимах будет не менее $\Delta U \approx 0,195$ %. Это значение практически совпадает с минимумами всех известных кривых допустимых размахов колебаний напряжения типа меандр [3, 5, 9].

Таким образом, при подаче на вход фликерметра колебаний напряжения типа меандр с размахами $\Delta U_M \approx 0,195$ % от номинального напряжения и частотой $f = 8,8$ Гц размах сигнала на выходе взвешивающего фильтра фликерметра должен быть равен единице, т. е. порогу заметности фликера.

При подаче на вход фликерметра колебаний напряжения синусоидальной формы с такой же частотой размах сигнала на выходе взвешивающего фильтра должен достигать единичного значения,

если размах колебаний напряжения на входе, согласно [1], будет на $\pi/2$ раз больше, чем при колебаниях напряжения типа меандр (т. е. $\Delta U_S = 0,306 \%$).

Согласно [3, табл. 1], при частоте $f = 8,8$ Гц порог заметности колебаний напряжения синусоидальной формы $\Delta U_S = 0,25 \%$, или на 22 % меньше. Такое завышение требований к электромагнитной совместимости фликерметром [3] вызвано тем, что мгновенная доза фликера P_{inst} пропорциональна не мгновенной, а среднеквадратичной доле порога заметности фликера ϵ .

Поэтому сигнал на выходе взвешивающего фильтра можно принять за мгновенную дозу фликера, как меру изменений ощущения зрительного восприятия (светлоты), вызванного световым источником, яркость которого изменяется во времени, выраженную в долях порога заметности фликера.

Этот показатель можно использовать и для оценки допустимости фликера с помощью фликерметра с другими источниками света. Например, согласно данным [11], для люминесцентных ламп (ЛЛ) PHILIPS TL-D 18 Вт порог заметности КН будет не ниже $\Delta U \approx 0,43 \%$, для компактных ЛЛ «Промінь» 15 Вт – $\Delta U \approx 0,7 \%$, а для ЛЛ энергосберегающих MAX US 1 ELS-020 32 Вт – $\Delta U \approx 1,03 \%$, что в 3–5 раз больше, чем для ламп накаливания.

Исключение из взвешивающего фильтра фликерметра квадратора, кроме повышения достоверности оценки электромагнитной совместимости, существенно упрощает аналитические методы анализа и статистическую обработку данных фликерметром, поскольку при случайных колебаниях вид закона распределения сигнала на выходе фликерметра не меняется.

Предлагаемую метрику восприятия фликера можно использовать и для оценки допустимости фликера по степени его отрицательного воздействия на человека с помощью фликерметра, например, принятием допустимого уровня превышения порога заметности фликера, но это в настоящее время возможно только методами экспертной оценки на основе известных исследований.

Заключение

1. Существующие методы оценки электромагнитной совместимости по дозе фликера базируются на фликерметре, моделирующем систему «колебания напряжения на зажимах лампы накаливания – мера зрительного ощущения», при применении современных источников света завышают требования к допустимым колебаниям напряжения в 3–5 раз.

2. Наличие квадратора на выходе взвешивающего фильтра фликерметра не подтвержден физиологическими исследованиями и приводит к результатам, противоречащим известным экспериментальным данным.

3. Замена квадратора на выходе взвешивающего фильтра фликерметра операцией умножения на коэффициент, обратно пропорциональный порогу заметности, позволяет принять дозу фликера как меру изменений ощущения зрительного восприятия, вызванного световым источником, яркость которого изменяется во времени, выраженную в долях порога заметности фликера.

4. Исключение из взвешивающего фильтра фликерметра квадратора, кроме повышения достоверности оценки электромагнитной совместимости, существенно упрощает аналитические методы анализа и статистическую обработку данных фликерметром.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бондаренко, М. Ф.** Модель инерции зрения / М. Ф. Бондаренко, С. Ю. Шабанов-Кушнарченко, Ю. П. Шабанов-Кушнарченко // Бионика интеллекта. – 2008. – № 1 (68). – С. 3–12.
2. Влияние качества питающего напряжения на параметры искусственного освещения рабочего места / Г. Я. Вагин [и др.] // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 3–2. – С. 247–252.
3. **ГОСТ 51317.4.15–2012 (МЭК 61000.4.15:2010).** Совместимость технических средств электромагнитная. Фликерметр. Функциональные и конструктивные требования. – Москва: Стандартинформ, 2014. – 71 с.
4. **ГОСТ 32144–2013 (EN 50160:2010, NEQ).** Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Москва: Стандартинформ, 2014. – 20 с.
5. **ГОСТ 30804.3.3–2013.** 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. – Москва: Стандартинформ, 2014. – 39 с.
6. **Kurenyy, E. G.** Assessment of flicker's action on the basis of synthesis of flickermeter block – scheme / E. G. Kurenyy, E. N. Dmitrieva, V. M. Kovalchuk // IEC TK77 WG4(NIKIFOROVA)99. – Paris, 1982. – P. 19.
7. **Дмитриева, Е. Н.** Погрешности расчета доз фликера напряжения и проверка функционирования фликерметра / Е. Н. Дмитриева, Э. Г. Куренный, В. А. Топчий // Электричество. – 2013. – № 2. – С. 28–33.
8. Совершенствование модели фликерметра / Э. Г. Куренный [и др.] // Электричество. – 2003. – № 2. – С. 17–23.
9. **Лисицкий, К. Е.** Совершенствование метода и средств оценки фликера при использовании источников света с разной чувствительностью к колебаниям напряжения в электрической сети / К. Е. Лисицкий // Проблемы энергетики. – 2018. – Т. 20, № 5–6. – С. 55–66.
10. **Мешков, В. В.** Светлота и яркость / В. В. Мешков // Светотехника. – 1958. – № 12. – С. 1–5.
11. **Овчинников, С. С.** Влияние характеристик зрительного анализатора и параметров источников света на амплитудно-частотную характеристику восприятия колебаний освещенности / С. С. Овчинников, М. М. Татарник // Светотехника и электроэнергетика. – 2008. – № 3. – С. 30–34.
12. **Песошин, В. А.** Модель зрительного анализатора восприятия парных световых импульсов / В. А. Песошин, В. В. Роженов // Вестн. КГТУ им. А. Н. Туполева. – 2006. – № 1. – С. 12–16.
13. **Шабанов-Кушнарченко, Ю. П.** Математическое моделирование некоторых функций человеческого зрения / Ю. П. Шабанов-Кушнарченко // Проблемы бионики. – 1973. – № 1. – С. 39–45.
14. Электромагнитная совместимость электроприемников промышленных предприятий / А. К. Шидловский [и др.]. – Киев: Наукова думка, 1992. – 236 с.

Статья сдана в редакцию 12 мая 2021 года

Владимир Михайлович Ковальчук, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-29-665-84-37. E-mail: vladmix@tut.by.

Vladimir Mikhailovich Kovalchuk, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University. Phone: +375-29-665-84-37. E-mail: vladmix@tut.by.