

**ДОНЕЦКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ**

На правах рукописи

**АБУ СИАМ Сами**

**МЕТОДЫ РАСЧЕТА  
ДИНАМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ  
ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ С ПЕРИОДИЧЕСКОЙ  
НАГРУЗКОЙ И СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

**Специальность 05.09.03 — «Электротехнические комплексы  
и системы, включая их управление и регулирование»**

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

ДОНЕЦК — 1992

21.3-1

ЛНБ ім. В. Стефаника



00330618 (L)

ВІСНИК НАУКОВОЇ АКАДЕМІЇ  
УМОВИ ВИДАВАННЯ

На правах додатку

ВІСНИК НАУКОВОЇ АКАДЕМІЇ

МЕТОДИ РАХУНУ  
ДИНАМІЧНИХ ПОКАЗАТЕЛІВ  
ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СОВМІСТНОСТІ  
ПРИ РОБОТІ СІМОВИХ АПРЕАТІВ  
НА ПЕРИОДИЧНОМУ ІНТЕРВАЛІ

Спеціальний випуск № 0033 — за статистикою та економікою  
і системним аналізом управління та регулювання

ВІСНИК НАУКОВОЇ АКАДЕМІЇ

Випуск № 0033 — за статистикою та економікою  
і системним аналізом управління та регулювання

AB-26.411

ДОНЕЦКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

АБУ СИАМ Самаи

МЕТОДЫ РАСЧЕТА  
ДИНАМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ  
СОВМЕСТИМОСТИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ С ПЕРИОДИЧЕСКОЙ  
НАГРУЗКОЙ И СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Специальность 05.09.03 - "Электротехнические  
комплексы и системы, включая их управление  
и регулирование"

А в т о р е ф е р а т  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Донецк - 1992

76 26. 777

Работа выполнена в Донецком ордена Трудового Красного  
Знамени политехническом институте

Научный руководитель: - доктор технических наук, профессор  
Э.Г. Куренный

Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор  
В.И. Гордеев

кандидат технических наук, доцент  
П.Х. Коцегуб

Ведущая организация - Институт электродинамики АН Украины,  
г. Киев

Защита диссертации состоится " 18 " февраля 1993 г.  
в 13<sup>00</sup> час. на заседании специализированного совета К 068.20.01  
при Донецком ордена Трудового Красного Знамени политехническом  
институте: 340000, г. Донецк, ул. Артема, 58.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Донецкого  
политехнического института.

Автореферат разослан " \_ " \_\_\_\_\_ 1992 г.

Ученый секретарь  
специализированного совета,  
канд. техн. наук, доцент



И. Т. Сидоренко

АНБ им. В. Стефанюка  
АН УРСР

Актуальность работы. Мощные электроприемники с резкопеременными и нелинейными нагрузками вызывают колебания и несинусоидальность напряжения, чем нарушают электромагнитную совместимость (ЭМС) других электроприемников. Ежегодный ущерб от плохого качества напряжения составляет 2 млрд. руб. в год (в ценах 1985 г.). При проектировании систем электроснабжения электрические нагрузки нарушающих ЭМС электроприемников считаются строго периодическими (прокатные станы, машины контактной электросварки, станки, прессы и др.).

Объективност, оценки ЭМС достигается при использовании динамических показателей, моделирующих воздействия колебаний и несимметрии напряжения на электрооборудование. Этим обуславливается актуальность создания методов расчета динамических показателей ЭМС.

Основу математической модели любого динамического показателя ЭМС составляет линейный фильтр, который моделирует реакцию рассматриваемого электроприемника на входное воздействие. Главной проблемой оценки ЭМС при проектировании является определение характеристик процесса на выходе фильтра. Для этой цели могут быть использованы известные методы теории линейных цепей. Однако непосредственное применение этих методов при проектировании затруднено из-за сложности исходных периодических графиков нагрузки. Применение же рекомендуемых в ГОСТ 13109-87 рядов Фурье не всегда обеспечивает требуемую точность расчетов.

Научная актуальность работы заключается в необходимости разработки методов определения параметров процесса после фильтра, дающих точное решение для сколь угодно сложных процессов и, в то же время, приспособленных к реализации на персональных ЭВМ. Работа выполнена по Координационному плану АН Украины по комплексной проблеме "Научные основы электроэнергетики" на 1991-1995 гг. и в Программе Министерства просвещения Украины по приоритетным направлениям развития науки и техники на 1991-1993 гг. по теме "Разработка теории и методов анализа электромагнитной совместимости в сетях электроснабжения".

Разрешаемое в диссертации основное научное противоречие состоит в том, что практика проектирования требует создания

методов расчета динамических показателей, а соответствующие научные обоснования таких методов недостаточно разработаны. Отставание объясняется тем, что математические модели динамических показателей ЭМС разработаны сравнительно недавно, а основное внимание уделялось методам расчета при случайных воздействиях.

Цель работы – повышение эффективности использования средств на обеспечение ЭМС путем научного обоснования точных методов расчета динамических показателей ЭМС электрооборудования и систем электроснабжения.

Научная задача – обоснование принципиально точных методов расчета по периодическим графикам электрических нагрузок электроприемников установившихся процессов на выходе линейных динамических систем, необходимых для обеспечения достоверных оценок ЭМС.

Основная идея работы заключается в рассмотрении только одного цикла работы электроприемника и учета периодичности повторения циклов в передаточной функции линейной части модели ЭМС электроприемника.

Защищаемые научные положения и результаты. Их новизна.

1. Метод "коэффициентов разложения" для расчета установившихся реакций электрооборудования на периодические помехи путем представления фильтра модели ЭМС в виде параллельно включенных инерционных звеньев. Элемент новизны состоит в том, что известное решение по методу припасовывания для инерционного звена применяется не для фильтра в целом, а отдельно для каждого из инерционных звеньев даже при наличии комплексных и кратных корней.

2. Метод "разности сверток" для расчета реакций электрооборудования, отличающийся тем, что для каждого динамического показателя ЭМС вводится условное понятие "свободной импульсной характеристики", обеспечивающей нахождение установившегося решения без разложения периодического процесса на простейшие функции.

3. Методики расчетов динамических показателей ЭМС электрооборудования по отклонениям, несимметрии, несинусоидальности и колебаниям напряжения, а также ЭМС конденсаторных установок. Новизна обусловлена применением метода разности сверток.

4. Новые соотношения между различными показателями ЭМС по колебаниям напряжения, и, в частности, несоответствие требований ГОСТ 13109-87 по кривым колебаний и дозе колебаний для одних и тех же процессов изменения напряжения.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций обусловлена применением теории автоматического управления, операторного исчисления, сходимостью результатов расчетов по методу разности сверток и рядам Фурье при сотнях гармоник - с погрешностями не более 1 % .

Научное значение работы заключается в развитии теории ЭМС электрооборудования и сети путем разработки принципиально точных методов расчета динамических показателей ЭМС при периодических воздействиях.

Практическая ценность работы состоит в том, что разработанные методы позволяют получать достоверные оценки ЭМС электрооборудования по любым показателям, чем обеспечивается эффективное использование средств на обеспечения ЭМС. Выявленное несоответствие между требованиями по колебаниям напряжения позволяет уточнить ГОСТ 13109-87.

Реализация выводов и рекомендаций работы. Предлагаемые методы оценки ЭМС доведены до инженерных методик расчетов динамических показателей ЭМС, которые могут быть использованы организациями, занимающимися проектированием электроснабжения промышленных предприятий, городов, сельского хозяйства, шахт, транспорта и др. Результаты работы могут быть использованы для уточнения ГОСТ 13109-87, а также при разработке стандарта Украины на качество электроэнергии.

Апробация работы. Основные положения работы доложены на Международной конференции по качеству электроэнергии (Польша, 1991 г.), Всесоюзном семинаре по электрическим нагрузкам и электропотреблению (г.Москва, МД НТП, 1989 г.), Республиканском семинаре АН Украины по вероятностным методам расчета (г.Донецк, 1992 г.).

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 4 научные работы.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов и заключения. Содержание работы изложено на 203 страницах машинописного текста, иллюстрировано 44 рисунками. Работа содержит 8 таблиц, список использованной литературы из 89 наименований и 2 приложений на 17 страницах.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность проблемы исследований, сформулированы цель и идея работы, излагаются решаемые задачи, а также основные результаты и положения, выносимые автором на защиту.

В первой главе дан анализ динамических показателей ЭМС и методов их расчета. Существующие методы расчета не всегда обеспечивают достоверность оценок: ряды Фурье - вследствие неопределенности количества  $N$  требуемых гармоник и принципиальной неточностью воспроизведения разрывных функций, численные методы решения дифференциальных уравнений - из-за накопления погрешности от цикла к циклу. Метод приспособывания частично используется в диссертации. Отсутствует анализ оценок ЭМС по различным показателям колебаний напряжения.

Во второй главе дается теоретическое обоснование методов расчета динамических показателей ЭМС при периодических помехах с длительностью цикла  $t_u$ .

Теоретически метод приспособывания позволяет получить установившееся решение для любого порядка  $n$  линейного дифференциального уравнения, описывающего процессы в фильтре. В диссертации это решение записано в матричной форме. Однако из-за трудностей вычисления матриц применение метода приспособывания эффективно лишь при малых  $n$ .

В связи с этим предложено представить фильтр в виде  $n$  параллельно включенных инерционных звеньев, записав передаточную функцию фильтра в виде

$$W(p) = \sum_{i=1}^n \frac{k_i}{T_i p + 1}, \quad (1)$$

где  $p$  - оператор дифференцирования, а коэффициенты передачи  $k_i$  и постоянные инерции  $T_i$   $i$ -го инерционного звена вычисляются по простым корням  $p_i$  характеристического уравнения:

$$T_i = -\frac{1}{p_i}, \quad k_i = (\rho - p_i) W(\rho) \Big|_{\rho=p_i}.$$

Для каждого инерционного звена методом приспособывания на-

ходятся установившиеся решения процессов на выходе звеньев. В силу принципа суперпозиции искомая реакция в установившемся режиме равна сумме всех процессов. Параметры звеньев в (1) могут быть и комплексными, но это не препятствует получению вещественного результата, так как при суммировании мнимые величины сокращаются.

Предложенная модификация метода припасовывания условно названа методом коэффициентов разложения. Этот же метод рекомендуется и при наличии  $z$  кратных корней  $p_i$ , когда

$$W(p) = \frac{k_1}{p-p_1} + \frac{k_2}{(p-p_1)^2} + \dots + \frac{k_z}{(p-p_1)^z}.$$

В этом случае каждый  $i$ -й член можно рассматривать как произведение  $i$  множителей с одинаковыми знаменателями  $(p-p_1)$ . Это позволяет применить метод припасовывания последовательно  $i$  раз, но каждый раз находится реакция только инерционного звена, что существенно упрощает выкладки и обеспечивает однотипность расчетов на ЭВМ.

В проектной практике исходные периодические графики электрической нагрузки  $q(t)$  обычно задаются кусочно-линейными функциями с  $m$  участками. Если отсчитывать время от начала  $i$ -го участка длительностью  $t_i$  с начальной ординатой  $q_{iH}$  и угловым коэффициентом  $a_i$ , нагрузка представляет линейную функцию

$$q_i(t) = q_{iH} + a_i t \quad \text{при } 0 \leq t \leq t_i.$$

Конечное значение  $q_{iK} = q_{iH} + a_i t_i$  нагрузки выражается через начальное.

Последовательность применения метода такова. Для звена с параметрами  $k$  и  $T$  при  $\gamma = 1/T$  записывается известное общее решение

$$y_i(t) = k[(q_{iH} - a_i T)(1 - e^{-\gamma t}) + y_{iH} e^{-\gamma t} + a_i t]. \quad (2)$$

Подстановка сюда значений  $t = t_i$  позволяет записать систему  $m$  алгебраических уравнений:

$$\begin{aligned} y_{iK} &= k[(q_{iH} - a_i T)(1 - e^{-\gamma t_i}) + y_{iH} e^{-\gamma t_i} + a_i t_i], \\ &\dots \\ y_{mK} &= k[(q_{mH} - a_m T)(1 - e^{-\gamma t_m}) + y_{mH} e^{-\gamma t_m} + a_m t_m], \end{aligned} \quad (3)$$

в которых количество неизвестных  $Y_H$  и  $Y_K$  больше  $m$ . Доопределить систему позволяют очевидные соотношения

$$Y_{1k} = Y_{2n}, \dots, Y_{m-1,k} = Y_{mn}, Y_{mk} = Y_{1n}.$$

После решения системы найденные значения  $Y_H$  подставляются в (2). Аналогичным образом находятся реакции для других инерционных звеньев, а полученные установившиеся решения суммируются.

Система уравнений (3) упрощается при ступенчатых графиках нагрузки, когда  $q_{in} = q_i$  и  $a_i = 0$ . Если нагрузка задана в виде разделенных малым интервалом времени  $\Delta$  последовательности ординат  $q_i$  (решетчатой функции), то в этом частном случае  $t_i = \Delta$ , а в пределах  $\Delta$  нагрузка считается неизменной или линейной, когда  $a_i = 0$  или  $a_i = (q_{i+1} - q_i)/\Delta$ .

Чтобы избежать решения алгебраических уравнений, в диссертации разработана модификация операторного метода, которая названа методом "разности сверток". Исходными являются известные выражения для общего и частного решений дифференциального уравнения:

$$y(t) = \sum \text{Res } e^{p t} q_u(p) W(p), \quad (4)$$

$$\tilde{y}(t) = \sum \text{Res } e^{p t} q(p) W(p), \quad (5)$$

в первом из которых вычеты берутся в особых точках  $q_u(p)W(p)$ , а во втором — только  $W(p)$ , где  $q_u(p)$  — изображение одного цикла периодического графика нагрузки  $q(t)$ .

В соответствии с теоремой о свертке выражение (4) записывается в виде

$$y(t) = \int_0^t q_u(\eta) g(t-\eta) d\eta \quad \text{при } 0 \leq t \leq t_u \quad (6)$$

где  $g(t)$  — импульсная характеристика фильтра,  $\eta$  — вспомогательная переменная интегрирования. Для того, чтобы применить теорему о свертке к (5), вводятся условные понятия "обобщенной" передаточной функции

$$W_u(p) = W(p) / (1 - e^{-p t_u}) \quad (7)$$

и "свободной" импульсной характеристики

$$\tilde{g}(t) = \sum \text{Res } e^{\rho t} W_4(\rho). \quad (8)$$

Обобщенная передаточная функция при  $t_4 \rightarrow \infty$  превращается в обычную. Условность термина "свободная" состоит в том, что функция  $\tilde{g}(t)$  не является реакцией фильтра на  $\delta$ -функцию, так как вычеты в (8), как и в (5), берутся только по полюсам передаточной функции. Вместе с тем формулы (7) и (8) позволяют получить выражения для частного решения (5) в таком же виде, что и (6).

Если цикл состоит из одного участка с функцией  $q_u(t)$ , то частное решение

$$\tilde{y}(t) = \int_0^{t_4} q_u(\eta) \tilde{g}(t-\eta) d\eta, \quad (9)$$

а установившееся решение равно разности выражений (6) и (9).

Если график электрической нагрузки содержит  $m$  участков, то общее решение для  $i$ -го участка с нагрузкой  $q_i(t)$  вычисляется по формуле (6), но при  $q_u(t) = q_i(t)$  и в пределах от 0 до  $t_i$ . Частное решение находится по выражению (9) для периодического графика нагрузки длительностью  $t_u$ , начало которого берется от начала участка:

$$\begin{aligned} \tilde{y}_i(t) = & \int_0^{t_i} q_i(\eta) \tilde{g}(t-\eta) d\eta + \int_{t_i}^{t_i+t_u} q_{i+1}(\eta) \tilde{g}(t-\eta) d\eta + \\ & + \dots + \int_{t_u-t_{i-1}}^{t_u} q_{i-1}(\eta) \tilde{g}(t-\eta) d\eta \quad \text{при } 0 \leq t \leq t_i \quad (10) \end{aligned}$$

Искомое решение для  $i$ -го участка

$$y_{iy}(t) = \int_0^{t_i} q_i(\eta) g(t-\eta) d\eta - \tilde{y}_i(t_i). \quad (11)$$

Для кусочно-линейных функций все интегралы однотипны, что упрощает реализацию метода на ЭВМ. Особенно эффективен метод разности сверток, если воспользоваться выражением (1), что и сделано в последующем.

Принципиальным преимуществом рассмотренных методов является то, что они дают аналитически точное установившееся решение.

Это позволяет использовать их для проверки корректности методов расчета.

В третьей главе рассматриваются методы расчета динамических показателей отклонений, несимметрии и несинусоидальности напряжения.

Помехи тем меньше сказываются на электроприемнике, чем больше его инерционность. Поэтому разработанные в ДПИ модели электроприемников с активной проводимостью содержат инерционный блок, который добавляется к блокам выделения помех. Расчет соответствующих инерционных показателей (отклонений напряжений, коэффициентов симметричных составляющих и несинусоидальности) однотипный и сводится к определению реакции на выходе инерционного звена.

В проектной практике отклонения напряжения рассчитываются по графикам реактивных нагрузок. Для расчета же инерционных отклонений напряжения надо использовать инерционные нагрузки, которые будут на выходе инерционного звена при подаче на вход  $q(t)$ . Их можно найти согласно (2) и (3) или методом разности сверток. В последнем случае, помимо известного выражения  $g(t) = e^{-\gamma t}$ , получена свободная импульсная характеристика

$$\bar{g}_r(t) = \frac{\gamma e^{-\gamma t}}{1 - e^{-\gamma t_4}} \quad (12)$$

Показано, что для любого  $i$ -го участка нагрузки можно сразу вычислить начальную ординату  $q_{rIN}$  в установившемся режиме. Например, для кусочно-линейной функции для первого участка

$$q_{rIN} = -\frac{e^{-\gamma t_4}}{1 - e^{-\gamma t_4}} \sum_{i=1}^n q_{iN} e^{\gamma(t_1 + \dots + t_{i-1})} (e^{\gamma t_i} - 1) + a_i e^{\gamma(t_1 + \dots + t_{i-1})} [e^{\gamma(t_1 + \dots + t_i)} (t_1 + \dots + t_i - T) - t_1 - \dots - t_{i-1} + T],$$

а установившееся решение при  $0 \leq t \leq t_4$  имеет вид

$$q_{r1y} = q_{iN} + a_i(t - T) + (a_i T - q_{iN} - q_{rIN}) e^{-\gamma t} \quad (13)$$

В отличие от (2) и (3) здесь решение записывается в конечном виде, что является достоинством метода разности сверток.

Инерционные коэффициенты симметричных составляющих и синусоидальности вычисляются аналогично по периодическим графикам обратной, нулевой последовательностей и нелинейных искажений синусоиды (без разложения на гармоники).

Составление программы расчетов на ЭВМ согласно (10) не встречает затруднений. Пользователю достаточно задать координаты начал и концов участков и постоянную  $T$  инерции. Если коэффициент формы графика более 1,11, производится пересчет максимумов средних нагрузок на максимумы эффективных нагрузок.

В качестве примера расчета потерь (и далее - колебаний) напряжения взяты графики реактивных нагрузок трех преобразовательных агрегатов прокатных станов, один из которых приведен на рис.1. Для того, чтобы потеря напряжения не превышала 5%, минимальные мощности  $S_{\text{к.з.}}$  короткого замыкания (к.з.) составляют 588, 426 и 236 МВ А при  $T = 0, 0,5$  и 10 мин. В проектировании потерю напряжения обычно вычисляют по расчетной нагрузке - получасовому максимуму, которому отвечает значение  $T = 10$  мин. Таким образом, неучет инерционности зависит требования к ЭМС по отклонениям напряжения в  $588/236 = 2,49$  раз. Попутно выяснилось, что рекомендация ПУЭ о расчете по получасовым максимумам средних нагрузок дает занижение на 16% по сравнению с максимумом эффективных нагрузок.

Наличие точного метода расчета позволило оценить корректность применения рядов Фурье. Для периодической последовательности прямоугольных импульсов при  $T = 0$  с увеличением  $N$  от единицы погрешность расчета максимума изменяется от 14% монотонно. Затем наступает момент, когда последующее значение практически не отличается от предыдущего, чем создается иллюзия достижения устойчивого решения с малой погрешностью. На самом деле, как известно, даже при  $N \rightarrow \infty$  максимумы воспроизводятся с погрешностью 9,9% (явление Гиббса).

Было выяснено, что при одной и той же средней частоте импульсов и одинаковых коэффициентах включения, но разных длительностях циклов, увеличение количества импульсов в цикле требуется количество гармоник существенно возрастает, хотя эффективная нагрузка остается неизменной.

Увеличение постоянной инерции сглаживает исходный график, что благоприятствует применению рядов Фурье. В пределе при

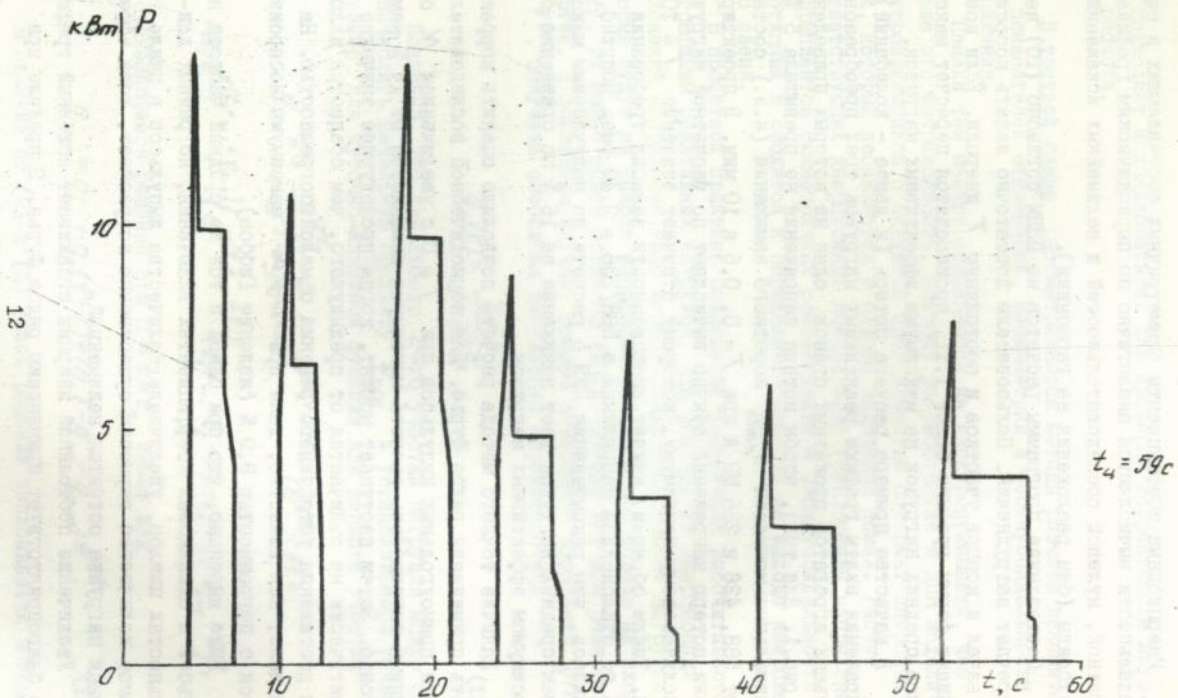


Рис. 1 |

$T \rightarrow \infty$  и  $N \rightarrow \infty$  ряд дает точное решение. При достаточно больших  $T$  расчет можно вести даже по одной гармонике, однако априори указать предельное значение  $N$  не представляется возможным. Для группы прокатных станов получены качественно такие же результаты: при малых  $T$  требуется сотни гармоник, а для расчета эффективных значений — единицы.

Коэффициент несинусоидальности не может оценивать ЭМС электроприемников с емкостной проводимостью: например, конденсаторных установок (КУ). Для них в ДПИ предложен инерционный динамический коэффициент несинусоидальности (Коломытцев А.Д.), который оценивает увеличение тока КУ вследствие несинусоидальности с учетом инерционности. Для его расчета необходимо рассчитать ток  $i_c$  КУ.

Расчетные графики несинусоидальности напряжения помех имеют скачки, поэтому в проектировании представлять КУ идеальной емкостью невозможно. В диссертации использована известная модель КУ в виде последовательно соединенных форсирующего звена с постоянной времени  $T_1$  и колебательного звена с постоянными  $T_4$  и  $T_5$ , которые определяются по емкости  $C$ , индуктивности и сопротивлению КУ. Передаточная функция КУ по току имеет вид

$$W_c(p) = k \frac{T_1 p + 1}{T_4^2 p^2 + T_5 p + 1},$$

где  $k = E/T_1$  — коэффициент передачи, имеющий размерность проводимости. Характеристическое уравнение имеет два корня

$$p_{1,2} = -\alpha_0 \pm j\lambda \quad \text{при} \quad \alpha_0 = T_5 / (2T_4^2), \quad \lambda = \frac{1}{T_4} \sqrt{1 - \frac{T_5^2}{4T_4^2}}.$$

По методу коэффициентов разложения при

$$A_1 = \sqrt{(1 - \alpha_0 T_1)^2 + \lambda^2 T_1^2}, \quad A_2 = 1 / \sqrt{\alpha_0^2 + \lambda^2},$$

$$\varphi_1 = \arctg \frac{\lambda T_1}{1 - \alpha_0 T_1}, \quad \varphi_2 = \arctg \lambda / \alpha_0, \quad \varphi = \varphi_1 + \varphi_2$$

передаточная функция была представлена в виде

$$W_c(p) = \frac{k_1}{T_5 p + 1} + \frac{k_2}{T_6 p + 1} = \frac{k A_1 A_2}{T_4^2} \left( \frac{e^{j\varphi}}{T_5 p + 1} + \frac{e^{-j\varphi}}{T_6 p + 1} \right),$$

где постоянные времени  $T_{5,6} = -1/p_{5,2}$  и коэффициенты передачи  $k_{1,2}$  представляют собой комплексные величины.

Далее согласно (2) и (3) составлялись системы алгебраических уравнений для обоих слагаемых передаточной функции, решение которых давали начальные ординаты  $y_{ni1}$  и  $y_{ni2}$  любого  $i$ -го участка. Например, для ступенчатого графика помехи со ступенями  $u_{ni}$  и длительностью  $t_i$  установившееся решение при  $0 \leq t \leq t_i$  имеет вид

$$y_{iy}(t) = (k_1 + k_2) u_{ni} - (k_1 u_{ni} - y_{ni1}) e^{-t e^{-j\varphi_2}/A_2} - (k_2 u_{ni} - y_{ni2}) e^{-t e^{j\varphi_2}/A_2}, \quad (14)$$

а начальная ордината  $y_{ni} = y_{ni1} + y_{ni2}$ . После преобразований входящие в (14) мнимые величины взаимно сокращаются.

Более компактным представляется метод разности сверток. Было обнаружено, что выражение (4) приводит к тому, что в конечных формулах появляются множители вида  $e^{\alpha_c t_4}$ , которые не помещаются в памяти ПЭВМ, поскольку у КУ значение  $\alpha_c$  велико. Поэтому вместо (4) использовано тождественное выражение

$$W_{40}(p) = \frac{e^{p t_4} W_c(p)}{e^{p t_4} - 1}, \quad (15)$$

которое приводит к членам вида  $e^{-\alpha_c t_4} \approx 0$ .

Входящие в последующие формулы величины  $A_3, \dots, A_7$  и  $\varphi_3, \dots, \varphi_6$  выражаются через параметры КУ, но для краткости соответствующие формулы здесь не приводятся. Помимо известной импульсной характеристики

$$g_c(t) = -\frac{k A_3}{T_4} e^{-\alpha_c t} \sin(\lambda t - \varphi_3),$$

была найдена свободная импульсная характеристика

$$\tilde{g}_c(t) = -\frac{k A_4}{\lambda T_4^2 A_5} e^{-\alpha_c(t+t_4)} \sin[\lambda(t+t_4) + \varphi_4 + \varphi_5]. \quad (16)$$

В диссертации согласно (5) и (6) получены в конечном виде выражения для установившихся токов конденсаторов для периодической последовательности прямоугольных импульсов. Например, при одинаковой длительности  $t_s$  импульсов и пауз при величине импульса  $u_s$ , ток определяется выражением

$$i_{сг}(t) = \pm \frac{k A_{11}}{\lambda T_4} u_s e^{-\alpha_c t} \sin(\lambda t + \varphi_{11}),$$

где плюс относится к участку импульса, а минус — паузы. С увеличением длительности цикла экстремумы по абсолютной величине вначале возрастают, достигая значения

$$i_{сг, max, min} = \pm \frac{k u_s}{\lambda T_4} A_{11} e^{-\alpha_c (T/2 - \varphi_{11}) / \lambda}, \quad (17)$$

а затем уменьшаются (рис. 2). Соответственно изменяются и эффективные значения  $i_{сг}$  токов.

Формула (17) дает мгновенные экстремумы токов при  $T = 0$ . Для учета инерционности КУ в модели добавляется инерционное звено с постоянной времени  $T$ . В этом случае

$$W_{сг}(p) = W_c(p) W_T(p) = W_c(p) \frac{1}{Tp + 1},$$

что позволило найти

$$\begin{aligned} g_{сг}(t) &= \frac{k T_1}{T T_4 A_{15}} \left[ A_{16} e^{-\alpha_c t} \sin(\lambda t + \varphi_{16} - \varphi_{15}) + \frac{T - T_1}{T T_1 A_{15}} e^{-\beta t} \right], \\ \tilde{g}_{сг}(t) &= \frac{k T_1}{T T_4 A_{15}} \left[ \frac{A_{16}}{A_5} e^{-\alpha_c (t + t_s)} \sin(\lambda t + \lambda t_s + \varphi_5 + \varphi_{16} - \right. \\ &\quad \left. - \varphi_{15}) - \frac{T - T_1}{T T_1 A_{15}} \frac{e^{-\beta (t + t_s)}}{e^{-\beta t_s} - 1} \right], \quad (18) \end{aligned}$$

чем решается задача о нахождении инерционных экстремумов тока.

Была выполнена проверка возможности применения рядов Фурье для расчета характеристик тока КУ. Как и следовало ожидать, наличие в модели КУ форсирующего звена существенно ухудшает сходимость ряда даже при вычислении эффективных токов КУ. Например, если ограничиться указанными в ГОСТ 13109-87 сорока гармониками, погрешность может достигать 70%. Погрешность вы-

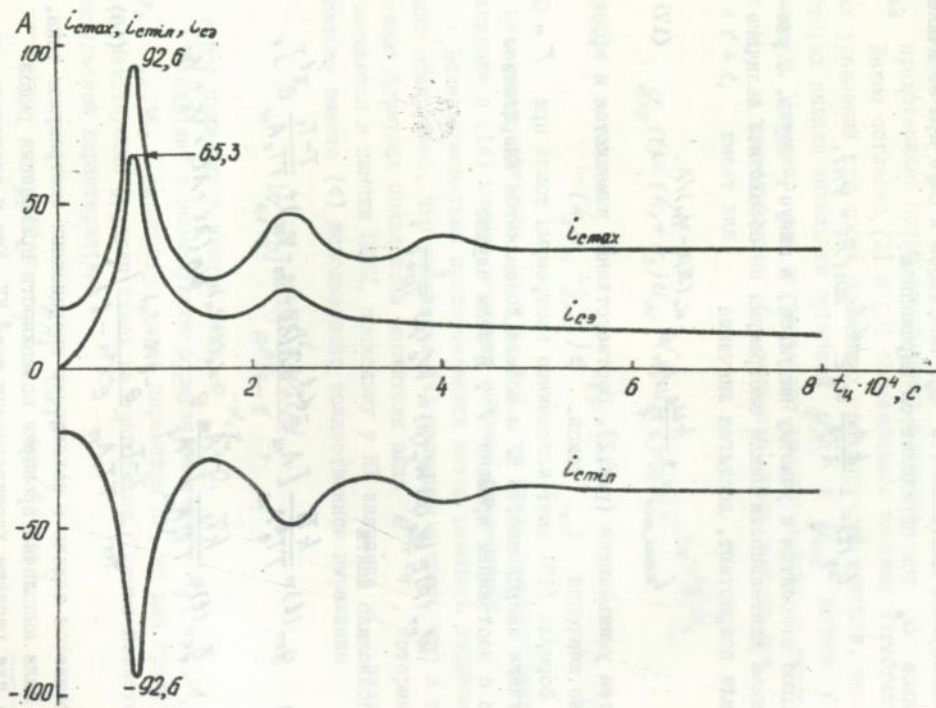


Рис. 2

числения экстремумов тока намного больше.

Составлены программы расчетов на ПЭВМ динамических показателей ЭМС по несимметрии и несинусоидальности напряжения.

В четвертой главе разработаны методы расчета показателей ЭМС по колебаниям напряжения. Рассмотрены известные динамические показатели: доза колебаний  $\psi$ , доза фликера  $\psi_k$ , степень резкости фликера (СРФ)  $\rho_{ср}$ , а также оценка по размахам колебаний  $\delta U_t$ .

Динамические модели дозы  $\psi$  и СРФ имеют одинаковый фильтр с известной передаточной функцией. Ее знаменатель имеет четыре корня, два из которых комплексные. В диссертации передаточная функция представлена в виде (1) при  $n = 4$ , а по ней получены импульсные характеристики в  $(\%)c^{-1}$ :

$$g_{\psi}(t) = - \left[ 65,04 e^{-25,51t} \cdot \sin(51,56t - 1,661) + 0,981 e^{-7,7t} - 63,79 e^{-138t} \right], \quad (19)$$

$$\ddot{g}_{\psi}(t) = - \left[ \frac{65,04}{z_1(t_4)} e^{-25,51t} \sin[51,56t - 1,661 - z_2(t_4)] + \frac{0,9814}{1 - e^{-7,7t_4}} e^{7,7t} + \frac{63,79}{1 - e^{-138t_4}} e^{138t} \right], \quad (20)$$

где

$$z_1(t_4) = \sqrt{(1 - e^{25,51t_4} \cos 51,56t_4)^2 + e^{51,02t_4} \sin^2 51,56t_4},$$

$$z_2(t_4) = \operatorname{arctg} \frac{e^{25,51t_4} \sin 51,56t_4}{1 - e^{25,51t_4} \cos 51,56t_4}.$$

Подстановка (19) и (20) в общие формулы (6), (10) и (11) позволила получить в конечном виде установившееся решение реакции  $f_{\psi y}(t)$  фильтра фликерметров, принятых в ГОСТ 13109-87 и МЭК (из-за громоздкости здесь не приводится). Доза колебаний равна квадрату эффективного значения процесса  $f_{\psi y}(t)$ .

В соответствии с динамической моделью, СРФ вычисляется по процедуре: процесс  $f_{\psi y}(t)$  возводится в квадрат, методом разности свертки находится реакция  $S(t)$  инерционного звена с  $T = 0,3$  с на процесс  $f_{\psi y}^2(t)$ , реакция  $S(t)$  выражается в р.и.

(*per unit*), строится упорядоченная диаграмма нормированного процесса  $S(t)$  и вычисляется СРФ по пяти уровням диаграммы.

Доза фликера, предложенная в ДПИ (Ковальчук В.М.), отличается от дозы колебаний видом передаточной функции и принципом выбора допустимого значения дозы. Для этого показателя аналогичным образом были найдены точные решения для ламп накаливания и люминесцентных ламп.

Для всех показателей были разработаны программы расчета на ПЭВМ, которые на примерах прямоугольных колебаний и колебаний нагрузки группы прокатных станков позволили выявить существенные различия в результатах оценок ЭМС и оценить погрешность расчета по рядам Фурье.

В ГОСТ 13109-87 принято два вида нормирования колебаний: по допустимым значениям  $\psi_g$  и кривым колебаний — зависимостям допустимых размахов  $\delta U_t$  колебаний от их частоты  $F$ . По смыслу для одного и того же процесса изменения напряжения оба вида должны давать практически совпадающие оценки ЭМС. Однако оказалось, что это очевидное требование не выполняется.

Например, для прямоугольных последовательностей импульсов, размахи и частоты которых приняты по кривой колебаний, были рассчитаны дозы  $\psi$  колебаний. При соответствии требований введенный в диссертации коэффициент соответствия

$$\varepsilon_{\psi} = \sqrt{\psi_g / \psi} \quad (21)$$

был бы равен единице для любых частот (штрихи на рис.3). В действительности требования совпадают лишь для двух частот (кривая 1). Наибольшее расхождение наблюдается в области малых частот (насосы, кондиционеры, холодильники): при частоте колебаний  $1 \text{ мин}^{-1}$  требования по кривым колебаниям в 3,6 раза жестче, чем по дозе.

Аналогичная проверка была выполнена и для резкопеременных нагрузок прокатных станков. Для колебаний сложной формы формула (21) неприменима, поэтому коэффициент соответствия определялся как отношение минимальных мощностей  $S_{\text{кmin}}$  к.з., при которых подключение прокатных станков еще не нарушает ЭМС по кривым колебаниям и по дозе. В табл.1 приведены значения мощностей к.з. при двух видах требований ГОСТ (для ламп накаливания и работ со значительным зрительным напряжением). Оценки по кривым ко-

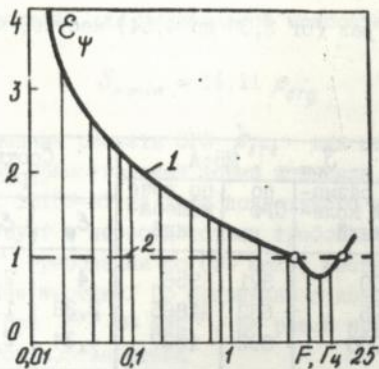


Рис.3

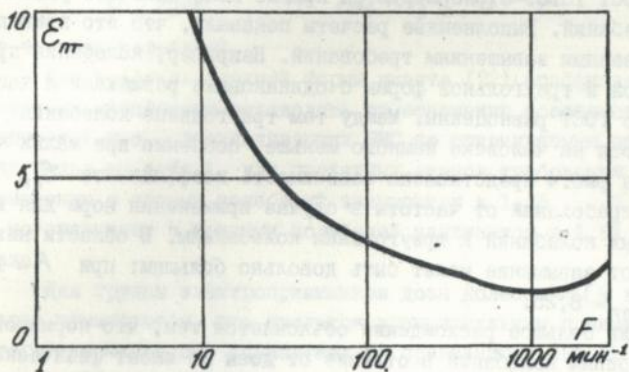


Рис.4

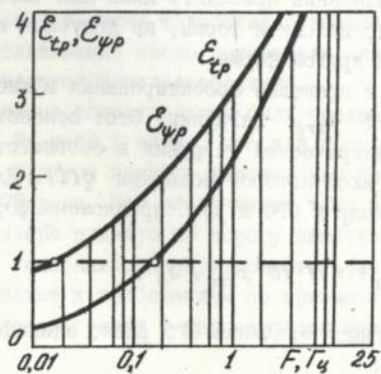


Рис.5

лебаний в несколько раз (от 2,38 до 4,34) жестче, чем по дозе колебаний.

Таблица 1

Агрегат	$S_{\text{к.п.н}}$ , МВ·А				Соответствие требований		
	по дозе колебаний	по размахам колебаний	по СРФ	по дозе колебаний	$E_{\psi}$	$E_{\psi p}$	$E_{t p}$
1АП	200	800	321	956	4	2,49	0,623
2АП	389	925	632	1865	2,38	1,46	0,616
3АП	461	2000	892	1827	4,34	2,23	0,517

В ГОСТ 13109-87 нормируются кривые колебаний без указания форм колебаний. Выполненные расчеты показали, что это приводит к существенным завышениям требований. Например, колебания прямоугольной и треугольной формы с одинаковыми размахами и частотами по ГОСТ равноценны. Между тем треугольные колебания сказываются на человеке намного меньше, особенно при малых частотах. На рис. 4 представлена зависимость коэффициента  $E_{\text{нт}}$  завышения требований от частоты в случае применения норм для прямоугольных колебаний к треугольным колебаниям. В области низких частот завышение может быть довольно большим: при  $F = 10 \text{ мин}^{-1}$   $E_{\text{нт}} = 8,25$ .

Столь большое расхождение объясняется тем, что нормирование по кривым колебаний в отличие от дозы не имеет физического смысла. Нормировать следует лишь дозы колебаний, а соответствующие им кривые колебания приводить лишь для частных случаев колебаний вполне определенной формы, не допуская их использования для колебаний другой формы.

Применительно к практике проектирования в диссертации вводится понятие СРФ  $P_{\text{стр}q}$  нагрузки. Этот показатель вычисляется по графику электрической нагрузки в соответствии с динамической моделью, на вход которой подается  $q(t)$ . Для перехода от СРФ нагрузки в Мвар к СРФ в р.и. предложена формула

$$P_{\text{СТ}} = 1,11 \cdot 10^3 P_{\text{стр}q} / S_{\text{к}}. \quad (22)$$

Так как допустимое значение СРФ равно единице, то из (22)

следует выражение для минимальной мощности к.з. в МВ·А:

$$S_{kmin} = 11,11 \rho_{srq} . \quad (23)$$

Выполненные расчеты СРФ  $\rho_{srq}$  для периодических последовательностей прямоугольной формы показала, что кривые колебаний из ГОСТ 13109-87 не дают допустимого значения  $\rho_{sr} = 1$ , что свидетельствует о несоответствии требований. В основном, при  $F > 2 \text{ мин}^{-1}$  требования по СРФ менее жесткие, а при малых частотах — более жесткие. По сравнению с дозой колебания норма СРФ жестче при  $F > 20 \text{ мин}^{-1}$ . На рис.5 приведены зависимости коэффициентов соответствия

$$\varepsilon_{tp} = \frac{1}{\rho_{srq}} , \quad \varepsilon_{\psi p} = \frac{1}{\rho_{srq}} \sqrt{\frac{\Psi}{\Psi_g}} = \varepsilon_{tp} / \varepsilon_{\psi} \quad (24)$$

от частоты колебаний.

Для графиков сложной формы вместо (22) коэффициенты соответствия предложено определять по отношению соответствующих мощностей к.з., обеспечивающих ЭМС по сравниваемым показателям. Как видно из табл.1, для прокатных станов требования по СРФ по сравнению с дозами колебаний завьшаются в 1,46 ... 2,49 раза, а по сравнению с кривыми колебаний занижаются в 1,61 ... 1,93 раза.

Для группы электроприемников дозы колебаний (и дозы фликера) суммируются, что является принципиальным преимуществом этого динамического показателя по сравнению с СРФ. К тому же расчет СРФ даже для одного электроприемника довольно громоздкий, а получаемые результаты не дают качественно новых представлений о воздействиях колебаний освещенности на человека. Поэтому использование этого показателя для нормирования колебаний представляется нецелесообразным.

Аналогичные сопоставления были сделаны для дозы фликера напряжения. Из табл.1 видно, что для прокатных станов требования по дозе фликера намного жестче, чем по дозе колебаний: в 3,96 ... 4,79 раза. Это объясняется тем, что допустимое значение дозы фликера принято по порогу заметности, а не по порогу раздражения колебаний. Следует отметить, что требования по дозе фликера ближе к требованиям по кривым колебаний, но это отнюдь не свидетельствует о корректности этих кривых.

В диссертации рассмотрена возможность расчета доз колебаний по формуле из ГОСТ 13109-87, использующей ряды Фурье. Теоретически при  $N \rightarrow \infty$  ряд Фурье дает точное решение, но при конечном количестве гармоник оценка ЭМС занижается.

Во-первых, предельное количество гармоник ограничено тем, что в ГОСТ задана АЧХ  $g_f$  фильтра в виде таблицы с предельным значением частоты  $1800 \text{ мин}^{-1}$ , поэтому можно использовать лишь  $1800/F$  членов ряда. Например, для прокатных станков такое ограничение дает погрешность расчета доз от  $-68,4$  до  $-79,1$  %. Чтобы снять это ограничение, рекомендуется задавать АЧХ аналитическим выражением.

Во-вторых, ряд Фурье при малых частотах колебаний плохо сходится. Например, для прямоугольных колебаний при частоте  $1 \text{ мин}^{-1}$  при изменении  $N$  от 997 на единицу последующее значение суммы ряда отличается от предыдущего менее, чем на  $0,1$  %, что якобы свидетельствует об устойчивости решения. На самом деле, сумма ряда меньше точного значения на  $-31,1$  %. Требуемое количество гармоник при больших частотах составляет единицы, а при малых частотах — сотни и тысячи.

Вместе с тем, расчеты для прямоугольных колебаний позволили установить при каком расхождении между последующим и предыдущим значениями  $N$  расчет по рядам Фурье дает приемлемое решение.

Понятие дозы фликера позволяет оценивать ЭМС по разным моделям для ламп накаливания и люминесцентных ламп. Ранее, по данным ДПИ, считалось, что люминесцентные лампы создают колебания освещенности в  $2,1$  раза меньше, чем лампы накаливания. Установлено, что для прямоугольных колебаний при малых частотах коэффициент эффективности больше  $2,1$  (при  $F = 0,01 \text{ Гц}$  на  $14,3$  %), а при больших — меньше (при  $F = 25 \text{ Гц}$  на  $22$  %). Эти данные позволяют более точно переходить от оценок ЭМС для ламп накаливания к оценкам для люминесцентных ламп.

В заключении отмечается, что в диссертации поставлена и решена научная задача обоснования принципиально точных методов расчета показателей ЭМС электрооборудования, позволяющая обеспечить эффективное использование средств на обеспечение ЭМС в системах электроснабжения любого назначения. Сделаны следующие обобщающие выводы.

1. Линейный фильтр в динамических моделях ЭМС электроприемника целесообразно представлять в виде параллельно включенных инерционных звеньев даже при мнимых постоянных времени (метод коэффициентов разложения). Тем самым повышается эффективность применения известного метода припасовывания и предложенного в диссертации метода разности сверток вследствие простоты нахождения установившегося решения для каждого звена в отдельности.

2. При наличии кратных корней в знаменателе передаточной функции фильтра динамической модели ЭМС рекомендуется последовательное нахождение реакций для одинаковых инерционных звеньев. При этом однотипность нахождения реакций для простых и кратных корней существенно упрощает расчеты на ЭВМ.

3. Разработанный метод разности сверток дает точное решение задачи вычисления любых динамических показателей ЭМС, что позволяет не только обеспечить достоверность оценок ЭМС, но и выполнять проверку любых других методов расчета.

4. Применение метода рядов Фурье для расчета динамических показателей ЭМС во многих случаях затруднено вследствие неопределенности в выборе количества учитываемых гармоник (от одной до тысячи) и принципиальной невозможностью точного воспроизведения разрывных функций, которые характерны для используемых в проектировании графиков электрической нагрузки электроприемников (прокатные станы, контактная электросварка и др.). Метод практически неприменим для расчета степени резкости фликера, а для расчета доз колебаний количество учитываемых гармоник рекомендуется определять путем последовательного их увеличения до тех пор, пока расхождение между смежными значениями станет меньше 0,01 %.

5. Разработанный пакет прикладных программ для ПЭВМ позволяет избавить проектировщика от громоздких рутинных вычислений при оценке ЭМС электроприемников по отклонениям, несимметрии и несинусоидальности напряжения; электроприемников с емкостной проводимостью по динамическому коэффициенту несинусоидальности, а также ЭМС осветительных электроприемников по дозе колебаний, дозе фликера и степени резкости фликера. Тем самым, кроме достоверности оценок ЭМС, достигается социальный эффект от применения методов.

6. Выявленное противоречие в требованиях ГОСТ 13109-87 по кривым колебаний и дозам колебаний, приводящее к взаимоисключа-

ющим оценкам ЭМС одного и того же процесса изменения напряжения, требует уточнения этого стандарта. За основу представляется целесообразным принять дозу колебаний, сохранив кривые колебаний лишь для частных случаев процессов изменения напряжения строго определенной формы (прямоугольной, треугольной, пилообразной).

7. Оценка допустимости колебаний напряжения по степени резкости фликера не соответствует кривым колебаний и дозам колебаний. Этот динамический показатель трудно применять для оценки ЭМС от группы электроприемников из-за нелинейности математической модели, что исключает возможность введения его в стандарт.

8. Применение динамических показателей ЭМС обеспечивает универсальность, достоверность и физический смысл оценок ЭМС, поэтому дальнейшие исследования должны идти по пути создания динамических моделей различных видов электрооборудования и на их основе – методов расчета и измерения.

В Приложении приведены распечатки трех программ вычисления доз колебаний и СРФ по методу разности сверток и доз фликера для лам. накаливания и люминесцентных ламп на языках Бейсик и Паскаль.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. Куренный Э.Г., Пушная И.В., Абу Сиам. Расчет доз колебаний напряжения при проектировании систем электроснабжения// Электрические нагрузки и электропотребление в новых условиях хозяйствования: Материалы семинара. – М.: МДНТП, 1989, с. 75–79.

2. Куренный Э.Г., Дмитриева Е.Н., Челкасов Ю.И., Коломытцев А.Д., Абу Сиам. Динамические показатели электромагнитной совместимости// *Jakosc energii elektrycznej. Międzynarodowa konferencja naukowa. – Spala: 1991, t. 1, s. 183–189.*

3. Шидловский А.К., Куренный Э.Г., Коломытцев А.Д., Погребняк Н.Н., Абу Сиам. Электромагнитная совместимость конденсаторных установок/Препринт 687 АН УССР. – Киев: 1990, с. 3–29.

4. Куренный Э.Г., Абу Сиам Саму. Расчет динамических показателей электромагнитной совместимости при проектировании сетей электроснабжения/ Донецк. политех. ин-т – Донецк, 1991, 16 с. – Деп. в УкрИНТЭИ № 1568–Ук 91, 16 с.

Личное участие соискателя: /1/ – методы расчета доз колебаний периодических графиков электрической нагрузки, /2/ и /4/ – методы коэффициентов разложения и разности сверток, /3/ – метод расчета показателей ЭМС конденсаторных установок при периодических искажениях напряжения.

Подп. в печать 05.01.93. Формат  $60 \times 84 \frac{1}{16}$ . Бумага типограф. Офсетная печать.  
Усл. печ. л. 1,39. Усл. кр.-отт. 1,62. Уч.-изд. л. 1,45. Тираж 130 экз. Заказ 4-7.  
Донецкий политехнический институт, 340000, Донецк, ул. Артема, 58

ДМАПП, 340050, Донецк, ул. Артема, 96

AB 26.411

**AB 26.411**