

**ДОНЕЦКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ**

На правах рукописи

КОЛОМЫТЦЕВ Аркадий Дмитриевич

**ДИНАМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ
ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ С СИСТЕМАМИ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ
ПО НЕСИММЕТРИИ И НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ
НАПРЯЖЕНИЯ**

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

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

ДОНЕЦК — 1993

ДОНЕЦКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

КОЛОМЫТЦЕВ Аркадий Дмитриевич

ДИНАМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ
С СИСТЕМАМИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ
ПО НЕСИММЕТРИИ И НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ

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 - 1993



00814703 (N)

Работа выполнена в
Знамени политехническом институте

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Э.Г. Куренный

Официальные оппоненты – доктор технических наук, профессор
В.В. Зорин
кандидат технических наук, доцент
Ю.В. Слепов

Ведущая организация – Институт электродинамики АН Украины,
г. Киев

Защита диссертации состоится "27" мая 1993 г.
в 13 30 час. в ауд. I20I на заседании специализированного
совета К 068.20.0I 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 "23" 04 1993 г.

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

И.Т. Сидоренко

ОБЩАЯ УАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Применение прогрессивных технологий ведет к увеличению единичной мощности электроприемников (ЭП) с несимметричными и нелинейными нагрузками. Следствием этой тенденции является ухудшение электромагнитной совместимости (ЭМС) электрооборудования с системами электроснабжения. По экспертным оценкам ежегодный экономический ущерб от ухудшения качества напряжения превышает 2 млрд.руб. (в ценах 1987 г.). Занижение требований к ЭМС приводит к экономическому и (или) социальному ущербу, а завышение - к неоправданным затратам на сеть электроснабжения. В связи с этим весьма актуальной является задача обеспечения достоверности оценок ЭМС.

Существующие показатели качества напряжения и методы их расчета являются неуниверсальными и недостаточными, так как относятся к частным случаям. Поэтому научная актуальность работы заключается в необходимости разработки универсальных показателей ЭМС, их нормирования, расчета и измерения при любых видах помех.

Работа выполнена в соответствии с Координационными планами АН Украины научно-исследовательских работ по комплексной проблеме "Научные основы электроэнергетики" на 1985-1990 г.г. и 1991-1995 г.г., а также программой научных исследований и разработок по приоритетным направлениям развития науки и техники Министерства образования Украины в рамках гостемы "Разработка теории и методов анализа электромагнитной совместимости в сетях электроснабжения".

Разрешаемое в диссертации оснс зое научное протнворечне

состоит в том, что существующие показатели качества напряжения (ПКН) относятся к частным случаям постоянных во времени или периодически изменяющихся помех, в то время как практика требует достоверной оценки ЭМС электрооборудования при случайных помехах.

Цель работы – повышение эффективности работы электрооборудования и электрических сетей путем обеспечения достоверности оценок ЭМС.

Научная задача – обоснование универсальных динамических показателей ЭМС по несимметрии и несинусоидальности напряжения, разработка методов их расчета и измерения при любых видах помех.

Основная идея работы заключается в моделировании воздействий помехи путем представления электроприемников в виде динамических систем с учетом их инерционности.

Защищаемые научные положения и результаты. Их новизна.

1. Принцип динамического моделирования применительно к оценке ЭМС по несимметрии и несинусоидальности напряжения, отличающийся тем, что используются показатели не входного процесса помехи, а процессов, непосредственно отражающих степень воздействия помехи на электрооборудование.

2. Математическая модель оценки ЭМС по коэффициентам симметричных составляющих и несинусоидальности, отличающаяся от существующих наличием инерционного (или кумулятивного) блока.

3. Новая математическая модель оценки ЭМС электрооборудования с емкостной проводимостью, состоящая из блока воздействия в виде модели конденсатора и инерционного (или кумулятивного) блока.

4. Методы расчета показателей ЭМС электрооборудования по

несинусоидальности, отличающиеся от существующих представлением помехи в виде случайного процесса, а не суммы гармонических составляющих.

5. Новые методы измерения динамических показателей ЭМС по несимметрии и несинусоидальности напряжения.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций обусловлена применением апробированных методов теории автоматического управления и теории случайных процессов, обоснованностью принятых допущений, совпадением оценок ЭМС для частных случаев по предложенным и существующим показателям.

Научное значение работы заключается в развитии теории статистической динамики систем электроснабжения путем разработки новых, адекватно отражающих воздействия помех на ЭП, моделей оценки ЭМС по несимметрии и несинусоидальности напряжения, а также обосновании универсальных методов расчета и измерения динамических показателей.

Практическая ценность работы состоит в том, что исключается необоснованное завышение затрат на обеспечение ЭМС за счет повышения достоверности ее оценок, а также существенно упрощаются экспериментальные исследования в электрических сетях. Разработанные приборы для оценки ЭМС позволяют предотвратить ущерб от нарушения ЭМС. Рекомендации по оценке ЭМС могут быть использованы для уточнения и дополнения ГОСТ 13109-87.

Реализация выводов и рекомендаций работы. Результаты выполненных исследований использованы ПЭО "Донбассэнерго", ПО "Донецкуголь" для оценки качества напряжения по несимметрии и несинусоидальности напряжения с помощью разработанных инерционных приборов; Институтом электродинамики АН Украины для

оценки ЭМС емкостных преобразователей напряжения для питания магнитодинамических установок (МДУ), а также при проектировании сети электроснабжения литейных цехов и конденсаторных установок с учетом обеспечения ЭМС МДУ. Экономический эффект от внедрения составил 1,875 тыс.руб. в год на одну установку (в ценах 1987 г.); Донецким политехническим институтом (ДПИ) в учебном процессе при чтении лекций по ЭМС.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались и обсуждались на Международных (/8, 16/), Всесоюзных (/1, 5, 6, 11, 13/), республиканских (/3, 17/) и вузовских научно-технических конференциях и семинарах, в том числе на УП Международном симпозиуме по ЭМС (Вроцлав, 1984 г.), Международной научной конференции "Качество электрической энергии" (Спала, 1991 г.), УП-IX сессиях Всесоюзного научного семинара АН СССР "Кибернетика электрических систем по тематике "Электроснабжение промышленных предприятий" (Новочеркасск, 1984-1987 г.г.), Республиканских научно-технических конференциях "Методы и средства измерения в области ЭМС" (Винница, 1987 и 1991 г.г.), семинарах Научного совета АН Украины по комплексной проблеме "Научные основы электроэнергетики".

Публикации. По результатам выполненных исследований и разработок опубликовано 19 научных работ и 3 отчета по законченным НИР.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и заключения. Содержание работы изложено на 226 страницах машинописного текста, иллюстрировано 49 рисунками. Работа содержит список использованной литературы из 166 наименований и 2 приложения на 8 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе приведен обзор и дан критический анализ существующих методов нормирования, расчета и измерения показателей ЭМС по несимметрии и несинусоидальности напряжения.

Принятые в ГОСТ 13109-87 ПКН по несимметрии и несинусоидальности напряжения не являются универсальными. Оценка ЭМС по коэффициентам K_{2U} обратной и K_{0U} нулевой последовательностей напряжения однозначна лишь для частного случая неизменных помех: если несимметрия длительно превышает допустимое значение, то ЭМС не соблюдается. При изменении же несимметрии возникает неопределенность: даже если максимум K_{2Um} или K_{0Um} превышает норму, но длительность выброса невелика, то выброс практически не скажется на ЭП. Поэтому принятые в качестве оценок ЭМС текущих максимумов помехи превышают требования.

Аналогичным образом требования ГОСТ 13109-87 по несинусоидальности относятся только к частному случаю периодической помехи, когда графики процессов изменения коэффициентов $K_{U(n)}$ n -х гармоник и $K_{НСU}$ несинусоидальности представляют собой горизонтали. Если искажения синусоида изменяются от цикла к циклу (рис. 1, шины 6 кВ металлургического завода), понятие гармоник теряет смысл, а требования ГОСТ становятся неопределенными. Кроме того, коэффициент несинусоидальности оценивает ЭМС лишь электроприемников с активной проводимостью, хотя практический интерес представляет оценка ЭМС ЭП

с емкостной проводимостью и изоляции.

Модель помехи в виде случайно изменяющимися во времени коэффициентами гармоник корректна лишь для частного случая очень медленного изменения искажений от цикла к циклу.

Во второй главе дается обоснование динамических моделей оценки ЭМС и динамических ПКН.

Для оценки ЭМС того или иного ЭП предложено использовать его математическую модель, на вход которой поступает помеха. Процесс на выходе модели отражает воздействие помехи на ЭП по натуральным показателям (нагрев, изменение производительности и др.). Поэтому параметры выходного процесса, которые названы динамическими ПКН, дают объективную оценку ЭМС при любых видах помех.

Модели ЭП могут быть самыми разнообразными, но для практических целей их количество должно быть как можно меньшим. Применительно к существующей практике нормирования качества напряжения в диссертации выделено четыре обобщенные группы ЭП: 1 - воздействия на которые характеризуются действующими значениями помехи и инвариантны к ее частотному диапазону (в частных случаях: K_{2U} , K_{0U} , $K_{нсU}$), 2 - воздействия зависят от скорости изменения помехи, 3 - чувствительные к нелинейности в узком диапазоне частот (в частном случае: $K_{U(n)}$), 4 - чувствительные к выбросам и провалам мгновенных значений кривой напряжения.

Неизбежное упрощение моделей ЭП не должно приводить к потере физического смысла. Это исключается, если учесть, что вследствие инерционности ЭП воздействие помехи не может проявляться мгновенно. Поэтому во всех динамических моделях предложено использовать низкочастотный сглаживающий фильтр в виде

кумулятивного или инерционного звеньев, осуществляющих линейные преобразования L_{θ} или L_{τ} . При кумулятивной оценке длительность θ интервала, на котором происходит непрерывное осреднение, определяется выдержкой времени релейной защиты, длительностью технологической операции и др. При инерционной оценке постоянная времени T инерционного звена совпадает с постоянной инерции объекта.

Соответственно в состав инерционной и энергетической моделей ЭП (рис. 2) входят блок 1 выделения из входного напряжения $u(t)$ помехи $u_n(t)$; блок 2 воздействия, по реакции $\xi(t)$ которого на помеху оценивается воздействие на ЭП некачественного напряжения; квадратор 3 и блок 4 кумулятивной или 5 инерционной оценок. Оценка ЭМС осуществляется по динамическим ПКН - дозам Ψ_{θ} или Ψ_{τ} , дающим однозначные результаты при любом виде помехи и имеющих четкий физический смысл. Кумулятивная доза

$$\Psi_{\theta} = \frac{1}{\theta} \int_{t-\theta}^t \xi^2(t) dt = L_{\theta} \{ \xi^2(t) \}$$

оценивает энергию воздействия помехи за промежуток времени θ . Инерционная доза, связанная с процессом $\xi(t)$ дифференциальным уравнением

$$T \Psi'_{\tau}(t) + \Psi_{\tau}(t) = \xi^2(t) \quad \text{или} \quad \Psi_{\tau} = L_{\tau} \{ \xi^2(t) \}$$

учитывает инерционность ЭП.

Понятие дозы применимо к помехам любого вида. Поэтому естественно потребовать, чтобы в частных случаях допустимое значение Ψ_{θ} дозы соответствовало бы нормируемым в ГОСТ 13109-87 показателям. Тем самым предложенные модели распространяют тре-

бования ГОСТ на любые виды помех.

ЭМС соблюдается, если расчетное максимальное значение Ψ_{Mx} дозы не превышает Ψ_{∂} . Расчетное значение вычисляется по среднему значению $\bar{\Psi}$ и дисперсии $D\Psi$ доз. Поскольку низкочастотный фильтр нормализует процесс на выходе, то заданной граничной вероятности E_x однозначно соответствует статистический коэффициент β в выражении

$$\Psi_{Mx} = \bar{\Psi} + \beta \sqrt{D\Psi}. \quad (1)$$

В ГОСТ 13109-87 $E_x = 0,05$, поэтому $\beta = 1,65$; в теории электрических нагрузок принято $\beta = \sqrt{3}$.

Обычно под реакцией понимается ток ЭП, поэтому дозы оценивают дополнительный перегрев от несимметрии и несинусоидальности напряжения: среднее значение дозы, равное квадрату эффективного значения I_3 тока, пропорционально среднему перегреву, а максимальное значение (1) - наибольшему перегреву (с вероятностью E_x).

В третьей главе рассматриваются динамические показатели несимметрии и несинусоидальности для ЭП первой и четвертой групп, а также методы их расчета при периодической и случайной помехах. Для этих групп ток прямо пропорционален подводимому напряжению, поэтому в динамической модели блок воздействия представляет собой безынерционное звено в виде активного сопротивления R , что позволяет назвать дозы R -показателями. Различие между группами лишь в том, что для первой группы используются действующие, а четвертой - мгновенные значения помех.

В качестве блока выделения помех используются фильтры симметричных составляющих напряжения для несимметрии или фильтр высших гармоник для несинусоидальности. Для учета инерционнос-

ти ЭП добавляется инерционный блок. Основана возможность отказать от квадратора при малом диапазоне изменения графика $U_{п}(t)$ действующих значений напряжения помехи: симметричных составляющих U_2, U_0 или искажения $U_{нс}$. В этом случае на выходе динамической модели будут протекать соответствующие инерционные процессы $U_{пТ}(t) = L_{Т} \{ U_{п} \}$. При больших диапазонах изменения помехи производится переход от $U_{пТ}$ к инерционным дозам.

Оценку ЭМС для несимметрии предложено производить по инерционным коэффициентом обратной $K_{2Т}$ и нулевой $K_{0Т}$ последовательностей (ИКОП и ИКНП)

$$K_{2Т} = (U_{2Т}/U_{н}) \cdot 100, \% ; \quad K_{0Т} = (U_{0Т}/U_{нФ}) \cdot 100, \%,$$

а для несинусоидальности - по инерционному коэффициенту несинусоидальности (ИКНС)

$$K_{нсТ} = (U_{нсТ}/U_1) \cdot 100, \%,$$

Эти R -показатели отличаются от существующих наличием инерционного блока, но в частных случаях неизменных помех совпадают с K_{2U}, K_{0U} и $K_{нсU}$. Поэтому допустимые значения (индекс "д") для инерционных коэффициентов приняты равными нормам для существующих ПКН. ЭМС будет соблюдаться, если выполняются условия

$$K_{2Т}(t) \leq K_{2Уд}, \quad K_{0Т}(t) \leq K_{0Уд}, \quad K_{нсТ}(t) \leq K_{нсУд}.$$

Выделение первой гармоники $U_1(t)$ по формуле ряда Фурье для периодической помехи громоздко, а для случайной лишено смысла. Предложено два способа получения U_1 : по упорядоченной диаграмме разности между графиком $u(t)$ и первым приближе-

нием для U_1 , а также путем сглаживания графика $u(t)$ низкочастотным блоком.

При проектировании графики помех отдельных ЭП обычно считают периодическими. Например, МДУ имеет график нагрузки, представленный на рис. 3. Для него получены конечные выражения для инерционного процесса

$$U_{пт}(t) = \begin{cases} B_0 - (B_0 - B_{тм})e^{-\gamma t} & \text{при } 0 < t < t_0, \\ B_B - (B_B - B_{тл})e^{-\gamma(t-t_0)} & \text{при } t_0 < t < t_B, \end{cases}$$

его максимального $B_{тм}$ и минимального $B_{тл}$ значений

$$B_{тм} = B_B - (B_B - B_0) \frac{b_B(1-b_0)}{1-b_B b_0}, \quad B_{тл} = B_0 + (B_B - B_0) \frac{b_0(1-b_B)}{1-b_B b_0},$$

дисперсии

$$DU_{пт} = (B_B - B_0)^2 \left[k_B(1-k_B) - \frac{\gamma(1-b_B)(1-b_0)}{t_ц(1-b_B b_0)} \right] \quad (2)$$

и плотности распределения

$$f(U_{пт}) = \frac{\gamma(B_B - B_0)}{t_ц(U_{пт} - B_0)(B_B - U_{пт})} \quad (3)$$

где $k_B = t_B/t_ц$, $t_ц = t_0 + t_B$, $\gamma = 1/T$, $b_{B,0} = e^{-\gamma t_{B,0}}$.

Среднее значение инерционного процесса равно среднему значению

$$\bar{U} = B_B k_B + B_0(1 - k_B) \quad \text{исходного графика.}$$

Динамические показатели от нескольких источников помех предложено вычислять по соответствующим индивидуальным показателям. При небольшом количестве m источников исходной для расчета является совместная плотность распределения (3). Расчет в этом случае удобно вести последовательно: сначала для двух ЭП по f_1 и f_2 находится плотность распределения

$$f_{1,2}(U_{пт}) = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(U_{пт1}) f_2(U_{пт} - U_{пт1}) dU_{пт1}$$

суммарного инерционного графика. Затем по $f_{1,2}$ и f_3 по такой же формуле находится плотность для трех ЭП и т.д. По найденной плотности и заданной вероятности E_x находится расчетное максимальное значение $U_{мТМ}$ инерционного процесса.

При большом количестве источников помех ($m > 3$) вероятностное распределение можно считать нормальным. Тогда

$$U_{мТМ} = \sum_{i=1}^m \bar{U}_i + \beta \sqrt{\sum_{i=1}^m DU_{птi}}$$

Инерционные ПКН позволяют избежать завышения требований к ЭМС. Мерой завышения является отношение максимума текущих значений помехи (при $T = 0$) к инерционному максимуму: например, $V_{ТМ}/V_B$ - для одной МДУ. Чем больше инерционность ЭП, тем больше завышение требований. На рис. 4 приведен график зависимости от T инерционного коэффициента обратной последовательности напряжения от 9 аппаратов дуговой электросварки. Согласно ГОСТ для всех ЭП, подключенных к этой сети, ЭМС нарушается. На самом деле, несимметрия будет сказываться только на ЭП с постоянной инерции менее 8 с.

В четвертой главе рассматриваются динамические показатели несинусоидальности и методы их расчета при случайных помехах для ЭП второй группы. Эти ЭП имеют емкостную проводимость, поэтому для них принят термин "С-показатели".

Для обеспечения достоверных и универсальных оценок ЭМС используется общая модель (рис. 2), в которой блок 1 представляет собой высокочастотный фильтр с полосой пропускания выше 50 Гц, а блок 2 (конденсатор) моделирует ток i_C ЭП. При малых значениях T , соизмеримых с длительностью t_f цикла первой гар-

моники, оценка ЭМС осуществляется по ординатам инерционного тока I_{CT} конденсатора. При $T \gg t_f$ в состав модели включается блок выделения действующих значений тока конденсатора, а оценка ЭМС производится по действующим значениям инерционного тока I_{CT} конденсатора.

Структура блока воздействия принята в соответствии с известной схемой конденсаторной установки (КУ) в виде двух последовательно включенных цепей: последовательной с активным сопротивлением r и индуктивностью L а также параллельной с активным сопротивлением R и емкостью C .

При $k = 1/R$, $T_1 = CR$, $T_2 = L/R$, $T_3 = rC$ передаточная функция блока воздействий (в См) представлена в виде

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

По ней были найдены амплитудно-частотная характеристика (АЧХ)

$$A_C(\omega) = k \sqrt{\frac{1 + \omega^2 T_1^2}{(1 - \omega^2 T_1 T_2)^2 + \omega^2 (T_2 + T_3)^2}}$$

и импульсная переходная характеристика

$$g_C(t) = \frac{a k}{\sqrt{T_1 T_2}} e^{-\lambda_c t} \sin(\lambda t + \varphi + \varphi_1),$$

где $a = \frac{1}{\lambda T_2} \sqrt{1 + T_2(1/T_1 - 2\lambda_c)}$, $\varphi = \arcsin(1/a)$,

$$\varphi_1 = \arcsin(\lambda_c \sqrt{T_1 T_2}), \quad \lambda_c = \frac{T_2 + T_3}{2 T_1 T_2}, \quad \lambda = \sqrt{\frac{1 - (T_2 + T_3)^2 / 4 T_1 T_2}{T_1 T_2}}$$

Инерционный ток i_{CT} или I_{CT} на выходе модели оценивает дополнительный перегрев КУ от несинусоидальности напряжения.

Среднее значение тока помехи и инерционного процесса равно нулю, поэтому для расчета максимального значения $i_{CTM} = \beta \sqrt{D i_{CT}}$ достаточно вычислить дисперсию $D i_{CT}$ инерционного тока КУ.

В отличие от существующего описания помехи в виде неизменных или случайно изменяющихся гармоник предложено в общем случае считать помеху случайным процессом. Для стационарной помехи исходными для расчетов являются спектральная плотность (СП) $S_n(\omega)$ или корреляционная функция (КФ) $k_n(\tau)$.

Инерционный блок имеет АЧХ $A_T(\omega) = 1/\sqrt{1+\omega^2 T^2}$, что позволило записать дисперсию в виде

$$Dl_{CT} = \int_0^{\infty} A_C^2(\omega) A_T^2(\omega) S_n(\omega) d\omega.$$

При использовании КФ помехи предлагается два пути. Во-первых, сначала определяется КФ процесса на выходе блока воздействия

$$k_3(\tau) = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} g_c(x) g_c(y) k_n(x-y+\tau) dx dy, \quad (4)$$

где x и y - вспомогательные переменные. Затем вычисляется инерционная дисперсия

$$Dl_{CT} = \gamma \int_0^{\infty} e^{-\gamma \tau} k_3(\tau) d\tau.$$

Во-вторых, без вычисления (4) находится импульсная переходная характеристика последовательно включенных блока воздействия и инерционного звена

$$g_{CT}(t) = \frac{k}{T_2} \left[\frac{(p_1 + \gamma_1) e^{p_1 t}}{(p_1 - p_2)(p_1 + \gamma)} + \frac{(p_2 + \gamma_1) e^{p_2 t}}{(p_2 - p_1)(p_2 + \gamma)} + \frac{(\gamma_1 - \gamma) e^{-\gamma t}}{(\gamma + p_1)(\gamma + p_2)} \right],$$

где $p_{1,2} = -\alpha_c \pm j\lambda$. Затем определяется инерционная дисперсия

$$Dl_{CT} = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} g_{CT}(x) g_{CT}(y) k_n(x-y) dx dy.$$

По смыслу частотный диапазон помехи ограничен слева частотой 50 Гц. Показано, что учет ограниченности диапазона необходим для получения физически наглядных результатов. При этом оказалось возможным использовать упрощенные модели блока воздействий в виде дифференцирующего или форсирующего звеньев с передаточными функциями pC или $k(T_1 p + 1)$, что существенно упрощает вычисление интегралов. Получены конечные выражения для инерционных дисперсий.

Для оценки ЭМС предложен емкостный коэффициент несинусоидальности

$$K_{\text{ст}} = \frac{I_{\text{ст}}}{I_{\text{н}}} \cdot 100, \quad K_{\text{ст}} = \frac{I_{\text{ст}}}{I_{\text{н}}} \cdot 100, \%,$$

который оценивает перегрузку КУ по отношению к номинальному току $I_{\text{н}}$.

Для определения допустимого значения $K_{\text{ст}}$ предложено исходить из допустимой согласно ПУЭ перегрузки КУ на 30%. При значении тока КУ 130% на долю несинусоидальности приходится $100\sqrt{1,3^2 - 1} = 83\%$. Следовательно, ЭМС не нарушается, если $K_{\text{ст}} < 83\%$. В частном случае периодических помех это условие принимает вид: $\sqrt{\sum_n K_{U(n)}^2} < 83\%$.

В ПУЭ длительность выдержки времени релейной защиты рекомендуется принимать равной 3...5 мин. Поэтому в качестве низкочастотного фильтра формально надо бы предусмотреть кумулятивный блок с $\theta = 3...5$ мин. Но, как и в теории электрических нагрузок, правильнее использовать инерционный блок $T = 1...1,67$ мин, что и принято в работе.

В пятой главе рассмотрены вопросы оценки ЭМС в действующих и проектируемых сетях электроснабжения.

Решена важная методическая проблема обеспечения достовер-

ности показаний анализатора гармоник (АГ) при оценке несинусоидальности в действующих электрических сетях. В случае строго периодической помехи надлежащим выбором АЧХ фильтров гармоник можно получить с помощью АГ точную оценку. Показано, что при случайной помехе, энергия которой определяется площадью под графиком СП помехи, применение АГ приводит к заниженной оценке. Чем уже полоса пропускания α_n фильтров АГ, тем больше погрешности определения стандартов помехи и тока КУ.

$$\delta_n = \frac{1}{\sigma_n} \sqrt{\sum_{n=2}^N \alpha_n S_n(\omega_n)} - 1, \quad \delta_{пс} = \frac{\omega_1 C}{\sigma_{пс}} \sqrt{\sum_{n=2}^N \alpha_n n^2 S_n(\omega_n)} - 1 \quad (5)$$

где $S_n(\omega_n)$ - ордината графика СП при частоте ω_n . Получены графики погрешностей (5) в зависимости от α_n и N для случая, когда СП помехи постоянна в диапазоне частот.

При проектировании динамические показатели ЭМС могут быть рассчитаны по КФ и СП помехи, экспериментально найденным в результате статистической обработки осциллограмм напряжения сети. Для учета ограниченности частотного диапазона помехи, по аналогии с усеченным вероятностным распределением, предложено ввести усеченную СП, равную нулю за пределами частотного диапазона.

В диссертации рассмотрены вопросы измерения динамических показателей. Для обеспечения единства нормирования и измерения целесообразно использовать приборы оценки ЭМС по динамическим показателям, структурные схемы которых совпадают с динамическими моделями оценки несимметрии и несинусоидальности. Поэтому для измерения инерционных коэффициентов обратной последовательности и несинусоидальности достаточно к существующим измерителям добавить инерционный блок в виде RC-цепи. На примере разработанных в ДПИ инерционных измерителей несимметрии и несинусоидальности представлены варианты исполнения фильтров симмет-

ричных составляющих напряжения и высших гармоник и проведена оценка их погрешностей.

Для оценки ЭМС КУ структурная схема прибора содержит блок воздействия с передаточной функцией идеального конденсатора, что в значительной степени облегчило приборную реализацию. Разработанный в ДПИ совместно с Институтом электродинамики АН Украины прибор оценки ЭМС КУ получил серебряную медаль на ВДНХ СССР в 1988 г.

Такая же динамическая модель использована в приборах оценки ЭМС других ЭП с емкостной проводимостью. Так, в работе доказано, что эта модель применима для оценки ЭМС МДУ, разработанных по энергосберегающей технологии и предназначенных для подогрева и перекачки жидкого металла. По схеме питания МДУ от емкостного преобразователя напряжения получены выражения для передаточной функции по току и АЧХ

$$A(\omega) = \omega C_{\text{п}} \sqrt{\frac{(1 - T_{\text{к}2}^2 \omega^2)^2 + T_{\text{к}1}^2 \omega^2}{[1 - (T_{\text{к}2}^2 + T_{\text{п}2}^2) \omega^2]^2 + (T_{\text{к}1} + T_{\text{п}1})^2}}, \quad (6)$$

где постоянные времени $T_{\text{к}1} = RC_{\text{к}}$, $T_{\text{п}1} = RC_{\text{п}}$, $T_{\text{к}2} = \sqrt{LC_{\text{к}}}$, $T_{\text{п}2} = \sqrt{LC_{\text{п}}}$ определяются параметрами R, L индуктора и электромагнита и $C_{\text{к}}$, $C_{\text{п}}$ емкостного делителя. Было доказано, что АЧХ (6) практически совпадает с АЧХ конденсатора.

Для оценки ЭМС МДУ был создан прибор, отличающийся по своей структуре от динамической модели оценки ЭМС КУ отсутствием высокочастотного фильтра. Это дало возможность осуществлять оценку ЭМС как по отклонениям, так и по несинусоидальности напряжения. Измерения с помощью этого прибора выполнялись до подключения МДУ к электрической сети. Это исключило возможность перегрузки конденсаторов, тем самым повысив функциональную надежность МДУ. Экономический эффект от внедрения прибора

составил 1,875 тыс.руб. в год на одну установку (в ценах 1987 г.).

В заключении отмечается, что в диссертации поставлена и решена научная задача разработки математических моделей универсальных показателей ЭМС электрооборудования по несимметрии и несинусоидальности напряжения. Сделаны следующие выводы:

1. Для обеспечения достоверности оценок ЭМС электрооборудования и систем электроснабжения следует исходить из принципа динамического моделирования.

2. Обобщенные модели ЭМС рекомендуется принимать в виде блоков выделения помех, воздействия, квадратора и инерционной (или энергетической) оценки, который позволяет исключить завышение требований к ЭМС.

3. Для обобщения требований к ЭМС целесообразно использовать динамические показатели ИКНП, ИКОП и ИКНС.

4. Оценку ЭМС ЭП с емкостной проводимостью целесообразно проводить по емкостному КНС, в общем случае моделируя емкость полной схемой замещения конденсатора.

5. При использовании АГ для устранения неопределенности результатов экспериментальных исследований необходимо устанавливать вид помехи.

6. Разработанные приборы для непосредственной оценки ЭМС по несимметрии и несинусоидальности в действующих электрических сетях позволяют без трудоемкой записи и обработки графиков изменения напряжения получить достоверные данные для проектирования или реконструкции сетей электроснабжения, а также обосновать необходимость и эффективность мероприятий по обеспечению ЭМС.

7. В ГОСТ 13109-87 целесообразно принять единый принцип нормирования показателей несимметрии и несинусоидальности с использованием разработанных в диссертации динамических моделей, с указанием передаточных функций, АЧХ, постоянной инерции,

а также методов измерения и вычисления показателей для любых видов помех.

В приложении приведены программа расчета КНС методом вычитания и результаты внедрения.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. Куренный Э.Г., Ковальчук В.М., Коломытцев А.Д. Оценка качества электроэнергии с использованием моделей объектов // Качество электроэнергии в сетях промышленных предприятий: (Материалы конференции). - М.: МДНТП, 1977. - С. 23-28.
2. Куренный Э.Г., Дмитриева Е.Н., Ковальчук В.М., Коломытцев А.Д. Кумулятивный принцип оценки качества напряжения // Электричество. - 1978. - № 9. - С. 19-24.
3. Куренный Э.Г., Дмитриева Е.Н., Ковальчук В.М., Коломытцев А.Д. Динамические модели электромагнитной совместимости при изменении напряжения // Современные проблемы энергетики: (Материалы науч.-техн. конференции). - Киев: 1980. - С. 31-35.
4. Куренный Э.Г., Трегер М.Б., Коломытцев А.Д. Кумулятивный измеритель несинусоидальности напряжения // Изв. ВУЗов. Электромеханика. - 1981. - № 2. - С. 187-189.
5. Куренный Э.Г., Ковальчук В.М., Коломытцев А.Д. Экспериментальные исследования качества напряжения с использованием динамических моделей электроприемников // Повышение качества электрической энергии в промышленных электрических сетях: (Материалы конференции). - М.: МДНТП, 1982. - С. 156-159.
6. Куренный Э.Г., Коломытцев А.Д., Пожидяев А.А. Электромагнитная совместимость силовых конденсаторов // Эффективность и качество электроснабжения промышленных предприятий: (Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конференции). - Жданов, 1983. - С. 20-22.
7. Шидловский А.К., Куренный Э.Г., Коломытцев А.Д. Статистическая динамика анализаторов гармоник // Техническая электро-

динамика. - 1983. - № 3. - С. 3-10.

8. Куренный Э.Г., Коломытцев А.Д. Динамические показатели электромагнитной совместимости при несинусоидальном напряжении // Электромагнитная совместимость: (Материалы УП Междунар. симпозиума). - Вроцлав: 1984. - Ч.2. - С. 563-570.

9. Куренный Э.Г., Дмитриева Е.Н., Ковальчук В.М., Коломытцев А.Д. О совершенствовании нормирования качества электроэнергии // Электричество. - 1987. - № 8. - С. 67-69.

10. Куренный Э.Г., Коломытцев А.Д. Оценка несинусоидальности напряжения без разложения в ряд Фурье. - Донецк, 1986. - 10 с. Деп. в УкрНИИТИ 15.01.87. № 187-Ук87.

11. Куренный Э.Г., Арутюнян А.Г., Коломытцев А.Д. Динамические модели электромагнитной совместимости систем электроснабжения // Повышение надежности и экономичности систем электроснабжения в условиях интенсификации производства: (Материалы семинара). - М.: МДНТП, 1987. - С. 80-83.

12. Борисов Б.П., Дмитриева Е.Н., Коломытцев А.Д. Динамические показатели электромагнитной совместимости магнетодинамических установок // Техн. электродинамика. - 1988. - № 1 - С. 37-43.

13. Дмитриева Е.Н., Коломытцев А.Д., Пожидаев А.А. Устройство экспресс-прогноза максимумов электрической нагрузки // Совершенствование нормирования и регулирования энергопотребления в промышленности: (Материалы семинара). - М.: МДНТП, 1987. - С. 74-77.

14. Шидловский А.К., Куренный Э.Г., Дмитриева Е.Н., Чепкасов Ю.И., Коломытцев А.Д. Линейная фильтрация и прогнозирование процессов в системах электроснабжения. - Киев, 1988. - 39 с. - Препр. / АН УССР. Ин-т электродинамики; № 596.

15. Шидловский А.К., Куренный Э.Г., Коломытцев А.Д., Погре-

бияк Н.А., Абу Сиам. Электромагнитная совместимость конденсаторных установок. - Киев, 1990. - 30 с. Препр. / АН УССР. Ин-т электродинамики; № 687.

16. Куренный Э.Г., Дмитриева Е.Н., Чепкасов Ю.И., Коломытцев А.Д., Абу Сиам. Динамические показатели электромагнитной совместимости // Качество электрической энергии: (Материалы международной науч. конференции). - Спала: 1991. - Т.1. - С. 183-189.

17. Куренный Э.Г., Чепкасов Ю.И., Коломытцев А.Д. Обеспечение достоверности оценок электромагнитной совместимости по несинусоидальности напряжения // Электромагнитная совместимость: (Материалы III Респуб. науч.-техн. конференции). - Винница: 1991. - Вып. 2. - С. 135-137.

18. Куренный Э.Г., Коломытцев А.Д., Найм Голь. Статистическая динамика систем компенсации тока замыкания на землю // Техн. электродинамика. - 1992. - № 4. - С. 69-75.

19. Куренный Э.Г., Коломытцев А.Д. Несимметрия нагрузки и напряжения. Искажения кривой напряжения. ЭМС силовых конденсаторов. Статистическая динамика анализаторов гармоник // В кн.: Шидловский А.К., Куренный Э.Г. Введение в статистическую динамику систем электроснабжения. - Киев:Наук.думка, п.п. УП.2, УП.4...УП.6, 1984. - 273 с.

Личное участие соискателя: /1,2,3,5,9,11/ - идея принципа динамического моделирования применительно к оценке несимметрии и несинусоидальности; /4,8,12,16/ - методы расчета динамических показателей; /6,15,17,18/ - методы расчета показателя ЭМС КУ при случайных помехах; /14/ - определение характеристик инерционных процессов при случайном характере электрических процессов; /7/ - методы расчета погрешностей АГ при случайных помехах; /13/ идея инерционного блока устройства экспресс-прогноза.

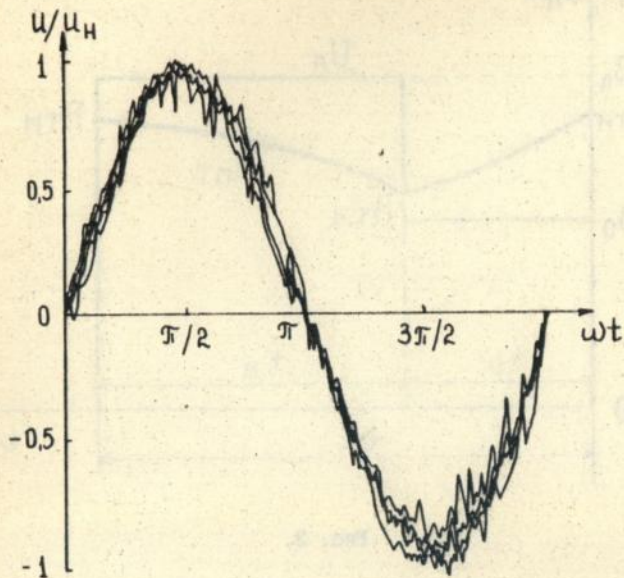


Рис. 1.

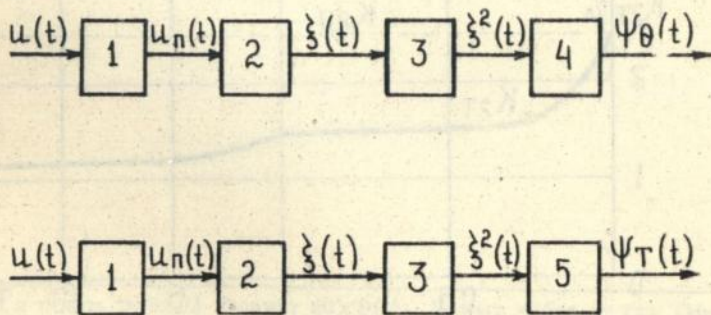


Рис. 2.

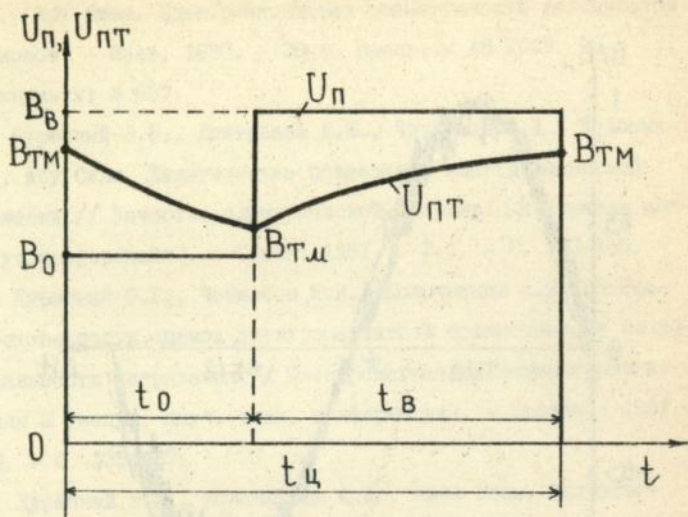


Рис. 3.

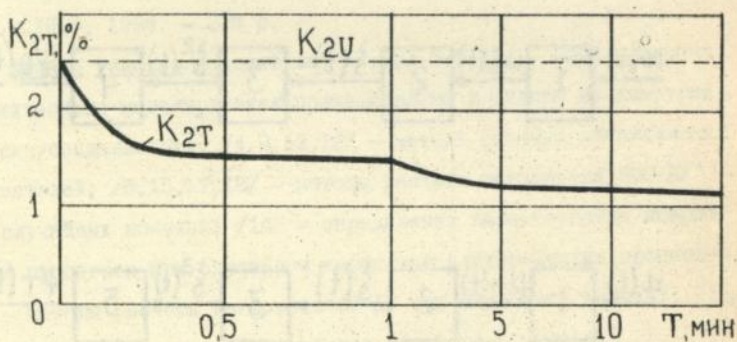


Рис. 4.

Подп. в печать 21.04.93. Формат 60×84¹/₁₆. Бумага отбор от газ. Офсетная печ.
Усл. печ. л. 1,39. Усл. кр.-отт. 1,62. Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 130 экз. Заказ 4-88.
Донецкий политехнический институт, 340000, Донецк, ул. Артема, 58

ДМАПП, 340050, Донецк, ул. Артема, 96

61157822

AB 27.217

AB 27.217