

## ДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ КОНДЕНСАТОРНЫХ УСТАНОВОК ПО НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ

Коломытцев А.Д., Шершун Д.А.

Донецкий национальный технический университет

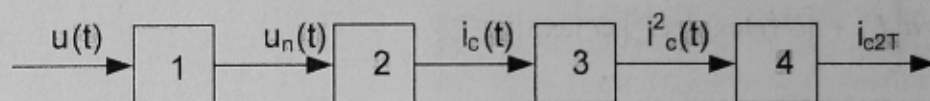
*The problem of electromagnetic compatibility (EMC) of capacitor installations by nonsinusoidal voltage is considered in this paper. The principle of dynamic modeling is used. The possibility of application of simplified dynamic models of EMC estimation, in which the block of influence is shown by differentiating and forced links, is proved.*

Применение прогрессивных технологий ведет к увеличению мощностей электроприемников с нелинейной и резкопеременной нагрузками. Следствием этого является ухудшение электромагнитной совместимости (ЭМС) электрооборудования с системами электроснабжения. В связи с этим актуальным является задача обеспечения достоверности оценок ЭМС, поскольку занижение требований к качеству электроэнергии приводит к экономическому ущербу, а завышение – к неоправданным затратам на систему электроснабжения.

Около 70% повреждений в системах электроснабжения из-за несинусоидальности напряжения приходятся на батареи статических конденсаторных установок (КУ). Эти повреждения связаны с перегрузкой КУ токами высших гармоник [2]. Следовательно, при оценке ЭМС КУ необходимо по заданным характеристикам напряжения сети найти характеристику тока КУ.

В работах [4,5,6,8,9] при оценке ЭМС предложено использовать принцип динамического моделирования, в соответствии с которым динамическая модель КУ (рис. 1,а) включает в себя блок выделения помехи (1), блок воздействия (2), квадратор (3) и инерционный блок (4).

а)



б)

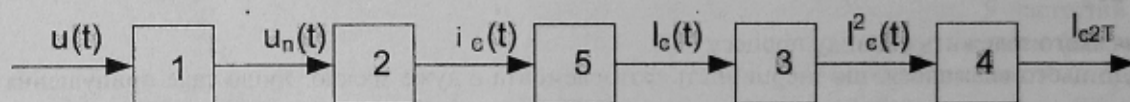


Рисунок 1 – Структурная блок-схема динамических моделей оценки ЭМС КУ по:  
а) инерционным мгновенным; б) действующим значениям токов второго порядка

Блок 1 при оценке ЭМС КУ по несинусоидальности представляет собой заградительный фильтр, не пропускающий сигналы на частотах 50 Гц и ниже. Процесс  $u_n(t)$  на выходе блока 1 будет называться помехой, которая при периодическом характере искажений напряжения равна разности между напряжением сети  $u(t)$  и его первой гармоникой. При случайном характере искажений, который наиболее характерен для реальных электрических сетей, понятие гармоник теряет смысл, а помеха  $u_n(t)$  представляет случайный процесс, характеристики которого зависят от вида входного процесса  $u(t)$  и параметров блока 1. Блок 2 моделирует мгновенные значения  $i_c(t)$  тока КУ, по которому оценивается воздействие помехи. Если оценка воздействия производится по действующим значениям  $I_C$  тока КУ, то в модель вводится блок 5 выделения действующих значений (рис. 1,б). Возведение в квадрат тока  $i_c$  блоком 3 моделирует процесс нагрева КУ. Блок 4 представляет собой инерционное звено с постоянной времени  $T$ , величина которой определяется временем действия релейной защиты или постоянной времени нагрева КУ, т.е. зависит от конкретных условий задачи оценки ЭМС.

Оценка ЭМС КУ будет производиться по величине дозы  $i_{c2T}$  второго порядка (или  $I_{c2T}$ ), максимум которой в относительных единицах будет совпадать с максимальной температурой перегрева КУ. В ряде случаев [8] возможна линеаризация задачи. При этом квадратор (блок 3) становится излишним, а оценка ЭМС осуществляется по величине дозы  $i_{cT}$  первого порядка, имеющей тот же физический смысл, что и  $i_{2T}$  [8].

Условия ЭМС будут выполняться, если

$$i_{СТМ} \leq i_{доп}$$

где  $i_{СТМ}$  — максимальное значение дозы;  $i_{доп}$  — допустимое значение дозы.

Для случайных процессов расчетные максимальные значения определяются через среднее значение  $\bar{i}_{CT}$  и дисперсию  $Di_{CT}$  инерционного процесса  $i_{CT}(t)$  на выходе динамической модели

$$i_{CTM} = \bar{i}_{CT} + \beta \sqrt{Di_{CT}},$$

где учтено, что средние значения инерционного и исходного графиков тока совпадают, а статистический коэффициент  $\beta$  связан с граничной вероятностью, и для практических целей можно принимать  $\beta = \sqrt{3}$  [8].

Так как среднее значение процесса на выходе блока 2  $\bar{i}_c = 0$ , то и на выходе блока 3, в силу его линейности, получим  $\bar{i}_{CT} = 0$ . Инерционная дисперсия в случае стационарной случайной помехи может быть получена по спектральной плотности помехи  $S_{II}(\omega)$ . Тогда:

$$Di_{CT} = \int_0^{\infty} A_C^2(\omega) \cdot A_T^2(\omega) \cdot S_{II}(\omega) d\omega, \quad (1)$$

где  $A_C(\omega)$  и  $A_T(\omega)$  – АЧХ блока воздействия и инерционного блока соответственно. АЧХ инерционного блока определяется выражением

$$A_T = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 T^2}}, \quad (2)$$

а выражение для  $A_C(\omega)$  определяется структурой блока воздействия. Как показано в [3] модель конденсатора представляет два последовательно соединенных звена: колебательное и форсирующее первого порядка с постоянными времени  $T_1, T_2, T_3$ , которые определяются параметрами схемы замещения. В этом случае АЧХ блока 2 будет иметь вид

$$A_C(\omega) = k \sqrt{\frac{1 + \omega^2 T_1^2}{(1 - \omega^2 T_1 T_2) + \omega^2 (T_2 + T_3)^2}}, \quad (3)$$

где  $k = C / T_1$  – коэффициент передачи, имеющий размерность проводимости.

Кроме этого, в диапазоне частот, которые учитываются при оценке несинусоидальности в [1], можно применять в качестве блока 2 безынерционное дифференцирующее звено [3] с АЧХ

$$A_C(\omega) = \omega C. \quad (4)$$

А в работе [9] предлагается более универсальная упрощенная модель конденсатора в виде форсирующего звена с АЧХ

$$A_C(\omega) = k \sqrt{1 + \omega^2 T_1^2}. \quad (5)$$

Сопоставим результаты расчетов инерционной дисперсии (1), полученные при использовании реальной и упрощенных моделей конденсатора. В качестве примера рассмотрим случай, когда в фазном напряжении присутствуют гармонические составляющие всех частот, а помеха представляет собой процесс с постоянной в диапазоне частот  $(\omega_n, \omega_k)$  спектральной плотностью [8]

$$S_{II}(\omega) = \begin{cases} \sigma_n^2 / \chi & \text{при } \omega_n \leq \omega \leq \omega_k, \\ 0 & \text{при } \omega < \omega_n \text{ и } \omega > \omega_k, \end{cases}$$

где  $\sigma_n$  – стандарт помехи,  $\chi = \omega_k - \omega_n$ .

Согласно выражению (1) для этого случая имеем

$$Di_{CT} = \frac{\sigma_n^2}{\chi} \int_{\omega_n}^{\omega_k} A_C^2(\omega) A_T^2(\omega) d\omega.$$

Подстановка сюда выражений (3), (4) и (5) АЧХ для реального и упрощенных моделей конденсатора и последующее интегрирование дают выражения для дисперсии инерционного тока КУ:

- для реального конденсатора

$$Di_{CT} = \frac{\sigma_n^2 k^2}{\chi} \int_{\omega_n}^{\omega_k} \left[ \frac{1 + \omega^2 T_1^2}{(1 - \omega^2 T_1 T_2)^2 + \omega^2 (T_2 + T_3)^2} \right] (1 + \omega^2 T^2) d\omega, \quad (6)$$

- для дифференцирующего звена

$$Di_{CT} = \begin{cases} \frac{\sigma_n^2 C^2}{\chi T^2} \left( \chi - \frac{1}{T} \operatorname{arctg} \frac{T\chi}{1 + \omega_n \omega_k T^2} \right) & \text{при } T > 0, \\ \frac{1}{3} \sigma_n^2 C^2 (\omega_n^2 + \omega_n \omega_k + \omega_k^2) & \text{при } T = 0; \end{cases} \quad (7)$$

- для форсирующего звена

$$Di_{CT} = \begin{cases} \frac{\sigma_n^2 k^2}{\chi T} \left[ \frac{\chi T_1^2}{T} + \left( 1 - \frac{T_1^2}{T^2} \right) \operatorname{arctg} \frac{T\chi}{1 + \omega_n \omega_k T^2} \right] & \text{при } T > 0, \\ \sigma_n^2 k^2 \left[ 1 + \frac{T_1^2}{3} (\omega_n^2 + \omega_n \omega_k + \omega_k^2) \right] & \text{при } T = 0. \end{cases} \quad (8)$$

На рис. 2 представлены зависимости относительных значений стандартов инерционных токов КУ  $\sigma_{CT}^* = \sqrt{Di_{CT}} / \sigma_n$  от постоянной инерции для реального конденсатора (кривая 1), а также его упрощенных моделей в виде дифференцирующего (кривая 2) и форсирующего (кривая 3) звеньев. Как видно, эти зависимости имеют один и тот же характер и практически совпадают.

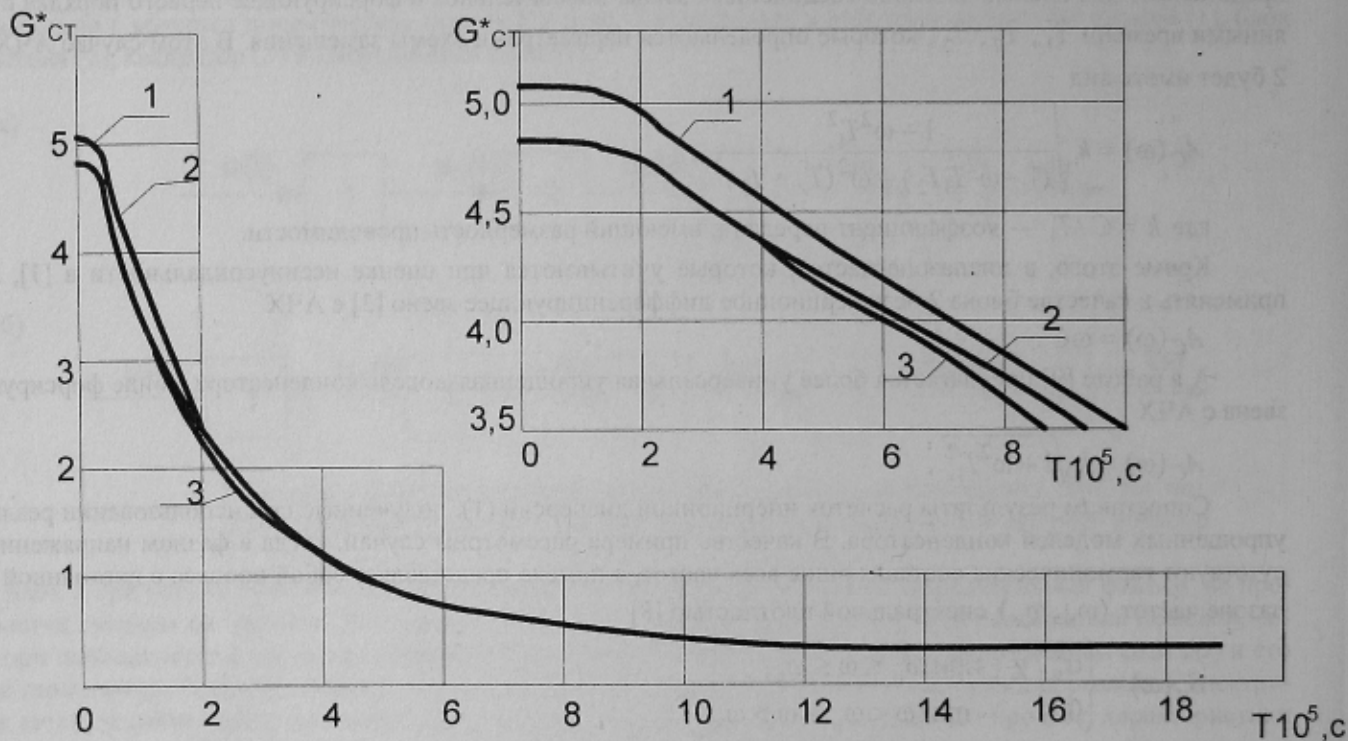


Рисунок 2 – Графики зависимостей относительных значений стандартов инерционных токов от постоянной инерции КУ для различных моделей конденсатора

Наибольшие погрешности определения  $Di_{CT}$  по сравнению с реальной моделью одинаковы для обеих упрощенных моделей и составляют  $-4,4\%$  при  $T=0$  (рис. 3). Для дифференцирующего звена на интервале значений  $T$  от  $1,5 \cdot 10^{-4}$  с до  $15 \cdot 10^{-4}$  с погрешность (кривая 1) будет положительной с максимальным значением  $3,1\%$  при  $T=4 \cdot 10^{-4}$  с, а для форсирующего звена (кривая 2) погрешность всегда отрицательна и не превышает значения  $-2,4\%$ .



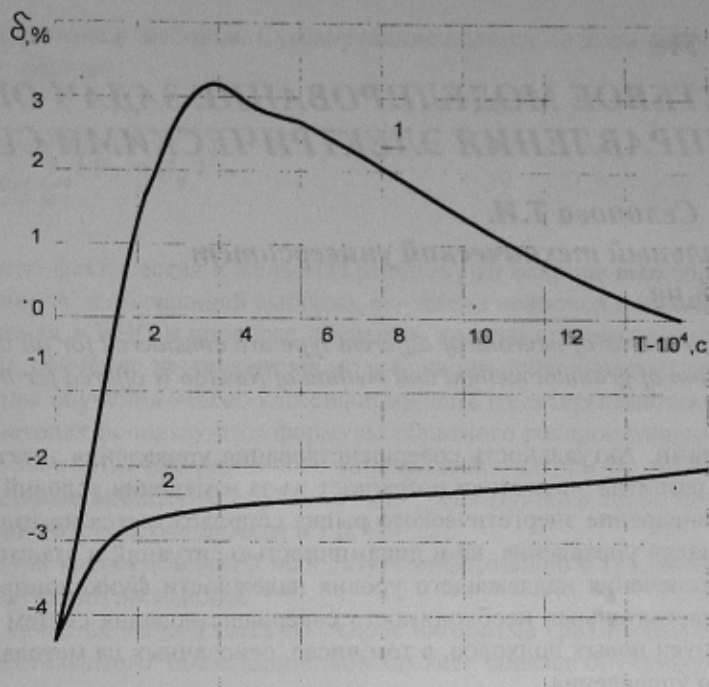


Рисунок 3 – Погрешность определения стандарта инерционного тока при различных моделях конденсатора

Отсюда можно сделать важный для практических целей вывод о том, что при использовании ограниченных по частотному диапазону выражений для спектральной плотности помехи можно применять и упрощенные модели конденсаторов в виде дифференцирующего или форсирующего звеньев. Это значительно упрощает решение задачи оценки ЭМС КУ как в проектируемых, так и в действующих электрических сетях.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 13109-97. Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. в Украине с 01.01.2000.
2. Койков С.Н., Мизенин О.Л. Анализ характеристик конденсаторов при воздействии несинусоидального напряжения // Электричество. – 1981. - №2. – С. 32-38.
3. Комлев В.П., Малафеев С.И. Динамическая модель силового конденсатора и ее применение для расчета потерь при искажениях напряжения. – Владимир, 1982. – 12с. – Деп. в Информэнерго 29.11.82, №1196эн – Д82.
4. Кузнецов В.Г., Куренный Э.Г., Любый А.П. Электромагнитная совместимость. Несимметрия и несинусоидальность напряжения. – Донецк. Норд-Пресс, 2005. – 250с.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Шидловский А.К., Куренный Э.Г. Введение в статистическую динамику систем электроснабжения. – Киев: Наук. думка, 1984. – 273 с.
9. Шидловский А.К., Куренный Э.Г., Коломытцев А.Д., Погребняк Н.Н., Абу Сиам. Электромагнитная совместимость конденсаторных установок. – Киев, 1990. – 30 с. – (Препр./АН УССР. Ин-т электродинамики; №687).

Рекомендовано проф., д.т.н. Куренным Э.Г.