

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ РЕГУЛИРУЕМЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Б.С. КУРНЫШЕВ, П.А. ФОМИН

(Ивановский государственный энергетический университет)

Внедрение в текстильную промышленность регулируемых асинхронных электроприводов с преобразователями частоты связано с проблемой электромагнитной совместимости (ЭМС). Преобразователи частоты таких электроприводов работают в режиме широтно-импульсной модуляции с частотой переключений транзисторов в диапазоне от 3 до 16 кГц в зависимости от мощности преобразователя. При этом мощность современных преобразователей, выпускаемых промышленностью, находится в пределах от единиц киловатт до сотен киловатт.

Каждое переключение транзисторов в преобразователях вызывает мощный импульс кондуктивных помех в двигательном и сетевом кабелях. Поскольку современные транзисторы, применяемые в преобразователях частоты, обладают способностью переключаться за время порядка 0,1 мкс, то спектр частот, возникающих в результате каждого переключения, составляет от сотен до десятков тысяч и более килогерц. При этом электрические кабели, соединяющие преобразователь с сетью переменного тока и с двигателем, становятся как бы антеннами, излучающими в пространство электромагнитную энергию (индуктивные помехи) значительной мощности.

Таким образом, каждый работающий преобразователь представляет собой источник кондуктивных и индуктивных помех. Эти помехи оказывают значительное воздействие на собственную нагрузку преобразователя (двигатель и двигательный кабель) и на другое электрооборудование. В силу этих причин действующие стандарты МЭК и Российские стандарты [1...3] регламентируют достаточно жесткие требования к уровню кондуктивных и индуктивных помех. В частности, по этим стан-

дартам синфазные помехи в электроприводах переменного тока с преобразователями частоты должны быть снижены от уровня в сотни вольт (в системах без фильтров) до уровня в несколько десятков милливольт (в системах с применением фильтров).

Для защиты электрооборудования от электромагнитных помех применяют устройства, работающие на принципах фильтров пассивного типа [4], [5], содержащих реакторы, конденсаторы и резисторы (фильтры ЭМС). Однако структура и параметры такого типа фильтров в значительной степени зависят от конфигурации и параметров промышленной сети, обусловленной другими потребителями электрической энергии, подключенными к данной сети, а также от характера нагрузки преобразователя (двигательный кабель, двигатель). В целом возникает достаточно сложная задача определения структуры и параметров пассивных фильтров, обеспечивающих ЭМС в заданной промышленной сети.

Применение только экспериментального метода в решении указанной задачи приводит к значительным финансовым затратам. В таком случае хорошим дополнением к экспериментальному методу являются математические модели. Вследствие этого задача разработки математических моделей и соответствующих программных средств для решения задач ЭМС представляется актуальной, поскольку сочетание эксперимента и расчета дает значительные дополнительные возможности при определении структуры и параметров фильтров ЭМС.

В процессе исследований выполнена разработка комплекса математических моделей и программных средств для исследования процессов распространения кондуктивных помех в сложных электротех-

нических системах типа промышленная сеть переменного тока – сетевые фильтры – преобразователь частоты – двигательные фильтры – двигательный кабель – двигатель переменного тока.

С этой целью использованы методы расчета электрических цепей, разбиения длинной линии с распределенными параметрами на участки конечной длины с сосредоточенными параметрами, численного интегрирования систем дифференциальных уравнений, а также тензорный анализ и натурный эксперимент.

Система уравнений для двух соседних (N и $N+1$) участков малой длины в произвольной точке кабеля имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} L_k \frac{dI_N}{dt} + R_k I_N &= -U_N + U_{N-1}, \\ I_{CN} &= I_N - I_{gN} - I_{N+1}, \\ I_{CN} &= C_k \frac{dU_N}{dt}, \\ I_{gN} &= g_k U_N, \\ L_k \frac{dI_{N+1}}{dt} + R_k I_{N+1} &= -U_{N+1} + U_N, \\ I_{CN+1} &= I_{N+1} - I_{gN+1} - I_{N+2}, \\ I_{CN+1} &= C_k \frac{dU_{N+1}}{dt}, \\ I_{gN+1} &= g_k U_{N+1}, \\ I_{N+2} &= \frac{U_{N+1}}{R_H}. \end{aligned} \right\} (1)$$

В системе (1) приняты следующие обозначения: R_k, L_k, C_k, g_k – параметры N -го участка кабеля; I_N, U_N – входной ток и выходное напряжение N -го участка; I_{N+1}, U_{N+1} – входной ток и выходное напряжение участка кабеля с номером $N+1$, U_{N-1} – входное напряжение N -го участка; I_{N+2} – входной ток участка кабеля с номером $N+2$; I_{CN}, I_{gN} – токи через емкость и через проводимость изоляции N -го участка; I_{CN+1}, I_{gN+1} – токи через емкость и через проводимость изоляции участка с номером $N+1$; R_H – сопротивление нагрузки второго по счету участка кабеля.

Для модели эквивалента нагрузки была принята тензорная система уравнений асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\psi_S}{dt} + R_1 I_S &= u_S \quad (S=1, 2), \\ \frac{d\psi_R}{dt} + \sum_{k=1}^{k=2} \omega_R^k \psi_k + R_2' I_R &= 0 \quad (R=3, 4), \\ \psi_S &= L_1 I_S + \sum_{R=3}^{R=4} L_m \Omega_S^R I_R \quad (S=1, 2), \\ \psi_R &= L_2' I_R + \sum_{S=1}^{S=2} L_m \Omega_R^S I_S \quad (R=3, 4). \end{aligned} \right\} (2)$$

Система уравнений (2) при постоянной частоте вращения вала двигателя и при постоянном модуле вектора потока сцепления ротора может быть приведена к следующему виду:

$$\sigma L_S \frac{d}{dt} |I_S| + \left(R_1 + R_2' \frac{L_m^2}{L_R^2} \right) |I_S| = |U_S| \cos \varphi - |E_{дв}|, (3)$$

где $I_S, U_S, E_{дв}$ – векторы тока и напряжения статора, противоЭДС двигателя; $\cos \varphi$ – коэффициент мощности; $\sigma, L_S, L_R, L_m, R_1, R_2'$ – параметры двигателя (параметры определяются экспериментально по переходным процессам в системе и не на номинальной частоте 50 Гц, а в спектре частот от сотен килогерц до сотен мегагерц).

В математической модели полупроводникового IGBT коммутатора была использована линейная временная зависимость с длительностью фронта 0,1 мкс:

$$U(t) = \begin{cases} kt, & t < t_\phi, \\ U_m, & t > t_\phi, \end{cases} (4)$$

где $U(t), U_m$ – мгновенное и амплитудное значения напряжения на выходе преобразователя частоты; t_ϕ – длительность фронта импульса выходного напряжения преобразователя частоты; k – коэффициент, определяющий крутизну фронта выходного импульса.

По результатам исследований предложен Г-образный LCR двигательный фильтр и получены зависимости его параметров в функции длины кабеля.

Модельными экспериментами доказано, что амплитуда перерегулирования напряжения в кабеле остается на постоянном уровне, если параметры LCR фильтра выбраны из соотношений

$$\begin{aligned} L_{\Phi} &= L_0 \ell_{\text{каб}}, \\ C_{\Phi} &= 4C_0 \ell_{\text{каб}}, \\ R_{\Phi} &= 2\sqrt{\frac{L_{\Phi}}{C_{\Phi}}}, \end{aligned} \quad (5)$$

где L_{Φ} – индуктивность фильтра, Гн; L_0 – приведенная индуктивность кабеля, Гн/м; C_{Φ} – емкость конденсатора фильтра, Ф; C_0 – приведенная емкость кабеля, Ф/м; $\ell_{\text{каб}}$ – длина кабеля, м; R_{Φ} – активное сопротивление фильтра, Ом.

ВЫВОДЫ

1. В электроприводах с преобразователями частоты необходимо использование двигательных фильтров, снижающих скорость нарастания выходного напряжения инвертора до уровня, допустимого стандартами.

2. Целесообразно использование Г-образных двигательных фильтров, построенных на основе дросселей, включаемых последовательно с жилами двигательного кабеля и цепей из последовательно включенных конденсаторов и активных сопротивлений (LCR фильтры).

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р 51317.4.15–99 (МЭК 61000-4-15–97). Совместимость технических средств электромагнитная. Фликерметр. Технические требования и методы испытаний. Вводится впервые.
2. ГОСТ Р 51317.3.2–99 (МЭК 61000-3-2–95). Совместимость технических средств электромагнитная. Эмиссия гармонических составляющих тока техническими средствами с потребляемым током не более 16 А (в одной фазе). Нормы и методы испытаний. Вводится впервые.
3. ГОСТ Р 51524–99. Совместимость технических средств электромагнитная. Системы электрического привода с регулируемой скоростью вращения. Требования и методы испытаний. Вводится впервые.
4. Курнышев Б.С., Фомин П.А. Электромагнитная совместимость в электроприводах переменного тока // Вестник ИГЭУ. – 2005.
5. Курнышев Б.С., Фомин П.А. Электромагнитная совместимость регулируемых асинхронных электроприводов: Монография. – Иваново, 2005.

Рекомендована кафедрой электропривода и автоматизации промышленных установок. Поступила 15.04.07.