

3. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0. — С-Пб.: КОРОНА принт, 2001. — 320 с.

4. Новиков А.А., Амелина М.А. Конспект лекций по курсу "Математическое моделирование в электронике". — Смоленск.: Филиал МЭИ, 2006. — 74 с.

5. Ортега Дж., Пулл У. Введение в численные методы решения дифференциальных уравнений. — М.: Наука, 1986. — 288 с.

6. Тиховод С. М. Разработка системы компьютерного моделирования динамических процессов во взаимосвязанных

нелинейных электрических и магнитных цепях // Техн. электродинамика. — 2008. — №3. — С. 16—23.

7. Тиховод С.М., Корнус Т.М. Программа для компьютерного моделирования электрических процессов в тиристорных цепях // Электротехника та електроенергетика. — 2002. — № 1.

8. Чебовский О.Г., Моисеев Л.Г., Недошивин Р.П. Силовые полупроводниковые приборы. Справочник. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 400 с.

9. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств и систем в Simulink. Power Electronics — элементы силовой электроники. http://matlab.exponenta.ru/simpower/book1/1_6.php

Надійшла 09.06.2008

УДК 621.314

В.С.БОЙКО, докт.техн.наук, Е.А.КУДРЯ, канд.техн.наук, А.А.ШУЛЯК (Нац. техн. ун-т Украины, "КПИ", Киев)

Расчет углов регулирования и коммутации в компенсационной преобразовательной системе с регулируемым коммутирующим устройством

Представлены результаты исследования электромагнитного процесса в преобразовательной системе компенсационного типа, коммутирующее звено которой содержит трехфазную конденсаторную батарею и силовые ключи, сочетающие функции устройства перезаряда конденсаторов и управления технологическим процессом в нагрузке. Рассмотрена особенность составления коммутационных соотношений, используемых для расчета углов регулирования и коммутации силовых вентилялей, соответственно различным режимам работы нагрузки.

Представлено результати досліджень електромагнітного процесу в перетворювальній системі компенсаційного типу, комутаційна ланка якої містить трифазну конденсаторну батарею та силові ключі, які виконують функції пристрою перезаряду конденсаторів та керування технологічним процесом у навантаженні. Розглянуто особливості складання комутаційних співвідношень, які використовуються для розрахунку кутів регулювання та комутації силових вентилів, відповідно до режимів роботи навантаження.

Статья посвящена дальнейшему исследованию электромагнитного процесса в компенсационной преобразовательной системе рис. 1, коммутирующее звено которой содержит кроме трехфазной конденсаторной батареи еще и силовые ключи, что позволяет регулировать выходные и энергетические характеристики системы. Результаты начала этих исследований изложены в [1], где получены соотношения для токов коммутации силовых вентилялей и токов фазы трехфазной конденсаторной батареи, соединенной в треугольник, при различных сочетаниях свободно устанавливающегося угла регулирования силовых вентилялей (диодов) и угла управления силовых ключей (например, тиристоров), задаваемого системой управления. Иссле-

дование показало, что таких сочетаний может быть шесть, и в работе они получили название диапазонов задержки (ДЗ).

Во все выражения токов входит величина свободно устанавливающегося опережающего угла регулирования (α) и угла коммутации (γ) силовых вентилялей, определить которые можно, исследовав особенности электромагнитного процесса.

В настоящей работе, как и в [1], при анализе приняты следующие допущения:

- система синусоидальных питающих ЭДС симметрична;
- вентили и ключи схемы идеальны;
- активное сопротивление оборудования и ошиновки не учитывается;

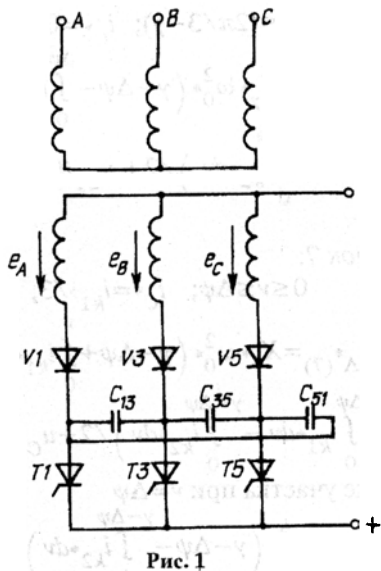


Рис. 1

— ток намагничивания преобразовательного трансформатора равен нулю;

— ток в цепи нагрузки (I_d) идеально сглажен.

В качестве условного начала отсчета принято начало коммутации в силовом вентиле V1 при переходе на него тока с вентиля V5. При этом система трехфазных питающих напряжений представляется в виде

$$e_A = E_m \sin(\nu + 30^\circ + \psi);$$

$$e_B = E_m \sin(\nu - 90^\circ + \psi);$$

$$e_C = E_m \sin(\nu + 150^\circ + \psi),$$

где E_m — амплитуда вторичного фазного напряжения преобразовательного трансформатора; $\nu = \omega t$ — текущая переменная; ψ — начальная фаза напряжения при включении вентиля.

Получим аналитические выражения для коммутирующего напряжения в исследуемой компенсационной преобразовательной системе. В общем случае напряжение фазы конденсаторов при включении их в треугольник, записанное для мгновенных значений, имеет вид

$$u_C = (\omega C)^{-1} \int i_C dv + u_C(0).$$

С учетом очередности вступления вентилях в работу и длительности процесса коммутации тока силовыми вентилями в кривой тока конденсаторной батареи можно выделить девять характерных участков. Столько же участков будет и в кривой коммутирующего напряжения. Считая закономерность изменения тока фазы коммутирующего напряжения известной [1], определим коммутирующее напряжение u_C , используя предыдущее выражение, записав его в относительных единицах:

$$u_{C\Delta}^* = \left(3X_\gamma \omega_0^2 / 2 \right) \int_0^\nu i_C^* dv + u_C(0)^*. \quad (1)$$

Для перехода к относительным единицам в работе принята следующая система базисных величин:

— базисное напряжение $U_6 = \sqrt{3} E_m$;

— базисный ток $I_6 = \sqrt{3} E_m / 2X_\gamma$; $X_\gamma = \omega L_\gamma$ — индуктивное сопротивление в фазе одиночной коммутации преобразователя, приведенное ко вторичной обмотке преобразовательного трансформатора;

— базисная мощность $S_6 = U_6 I_6 = 1,5 E_m^2 / X_\gamma$;

— базисная частота $\omega_6 = \omega = 314$ рад/с;

— базисная реактивность цепи переменного тока $X_6 = \sqrt{3} E_m / 2I_d$.

Поскольку выражения токов коммутирующих конденсаторов для четных и нечетных диапазонов задержки отличаются, расчет коммутирующего напряжения для указанных диапазонов задержки произведем отдельно.

Сначала рассмотрим нечетные диапазоны задержки, начиная с ДЗ1. Работу преобразовательной системы в указанном режиме иллюстрирует рис. 2, а, б, в, представляющий динамику изменения формы тока коммутирующих конденсаторов и коммутирующего напряжения. Рис. 2, а соответствует отсутствию задержки коммутации, когда $\Delta\psi = 0$. На рис. 2, в задержка коммутации максимальная для рассматриваемого режима работы ($\Delta\psi = \gamma$).

Расчет ведем по всем девяти участкам, номера которых указаны на рис. 2, б.

Участок 1:

$$0 \leq \nu \leq \Delta\psi; \quad i_C^* = -2i_{k1}^*/3;$$

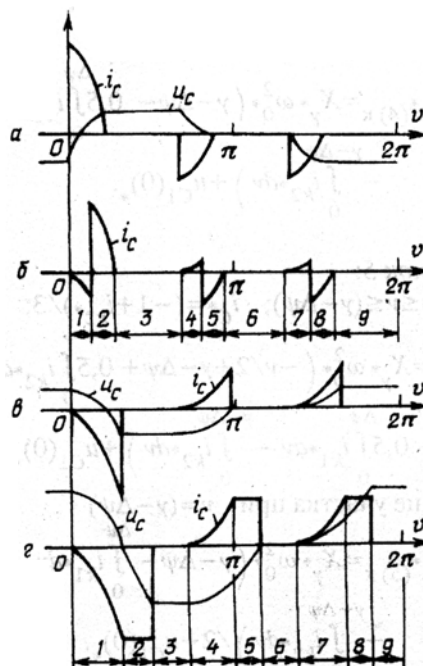


Рис. 2

$$u_{C\Delta^*(1)} = -X_\gamma \omega_0^2 \int_0^\nu i_{k1}^* dv + u_{C1}(0)_*$$

В конце участка при $\nu = \Delta\psi$

$$u_{C\Delta^*(1)к} = -X_\gamma \omega_0^2 \int_0^{\Delta\psi} i_{k1}^* dv + u_{C1}(0)_*$$

Участок 2:

$$0 \leq \nu \leq (\gamma - \Delta\psi); \quad i_{C^*} = 2(1 - i_{k2}^*)/3;$$

$$u_{C\Delta^*(2)} = X_\gamma \omega_0^2 \left(\nu - \int_0^\nu i_{k2}^* dv - \int_0^{\Delta\psi} i_{k1}^* dv \right) + u_{C1}(0)_*$$

В конце участка при $\nu = (\gamma - \Delta\psi)$

$$u_{C\Delta^*(2)к} = X_\gamma \omega_0^2 \left(\gamma - \Delta\psi - \int_0^{\Delta\psi} i_{k2}^* dv - \int_0^{\Delta\psi} i_{k1}^* dv \right) + u_{C1}(0)_*$$

Участок 3:

$$0 \leq \nu \leq (2\pi/3 - \gamma); \quad i_{C^*} = 0;$$

$$u_{C\Delta^*(3)} = X_\gamma \omega_0^2 \left(\gamma - \Delta\psi - \int_0^{\gamma - \Delta\psi} i_{k2}^* dv - \int_0^{\Delta\psi} i_{k1}^* dv \right) + u_{C1}(0)_*$$

На этом участке, как и на всех последующих, номера которых кратны 3, величина коммутирующего напряжения не изменяется.

Участок 4:

$$0 \leq \nu \leq \Delta\psi; \quad i_{C^*} = i_{k1}^*/3;$$

$$u_{C\Delta^*(4)} = X_\gamma \omega_0^2 \left(\gamma - \Delta\psi + 0,5 \int_0^\nu i_{k1}^* dv - \int_0^{\Delta\psi} i_{k1}^* dv - \int_0^{\gamma - \Delta\psi} i_{k2}^* dv \right) + u_{C1}(0)_*$$

В конце участка при $\nu = \Delta\psi$

$$u_{C\Delta^*(4)к} = X_\gamma \omega_0^2 \left(\gamma - \Delta\psi - 0,5 \int_0^{\Delta\psi} i_{k1}^* dv - \int_0^{\gamma - \Delta\psi} i_{k2}^* dv \right) + u_{C1}(0)_*$$

Участок 5:

$$0 \leq \nu \leq (\gamma - \Delta\psi); \quad i_{C^*} = (-1 + i_{k2}^*)/3;$$

$$u_{C\Delta^*(5)} = X_\gamma \omega_0^2 \left(-\nu/2 + \gamma - \Delta\psi + 0,5 \int_0^\nu i_{k2}^* dv - 0,5 \int_0^{\Delta\psi} i_{k1}^* dv - \int_0^{\gamma - \Delta\psi} i_{k2}^* dv \right) + u_{C1}(0)_*$$

В конце участка при $\nu = (\gamma - \Delta\psi)$

$$u_{C\Delta^*(5)к} = X_\gamma \omega_0^2 \left(\gamma - \Delta\psi - \int_0^{\Delta\psi} i_{k1}^* dv - \int_0^{\gamma - \Delta\psi} i_{k2}^* dv \right) / 2 + u_{C1}(0)_*$$

Участок 6:

$$0 \leq \nu \leq (2\pi/3 - \gamma); \quad i_{C^*} = 0;$$

$$u_{C\Delta^*(6)} = X_\gamma \omega_0^2 \left(\gamma - \Delta\psi - \int_0^{\Delta\psi} i_{k1}^* dv - \int_0^{\gamma - \Delta\psi} i_{k2}^* dv \right) / 2 + u_{C1}(0)_*$$

Участок 7:

$$0 \leq \nu \leq \Delta\psi; \quad i_{C^*} = i_{k1}^*/3;$$

$$u_{C\Delta^*(7)} = X_\gamma \omega_0^2 \left(\gamma - \Delta\psi + \int_0^\nu i_{k1}^* dv - \int_0^{\Delta\psi} i_{k1}^* dv - \int_0^{\gamma - \Delta\psi} i_{k2}^* dv \right) / 2 + u_{C1}(0)_*$$

В конце участка при $\nu = \Delta\psi$

$$u_{C\Delta^*(7)к} = X_\gamma \omega_0^2 \left(\gamma - \Delta\psi - \int_0^{\gamma - \Delta\psi} i_{k2}^* dv \right) / 2 + u_{C1}(0)_*$$

Участок 8:

$$0 \leq \nu \leq (\gamma - \Delta\psi); \quad i_{C^*} = (-1 + i_{k2}^*)/3;$$

$$u_{C\Delta^*(8)} = X_\gamma \omega_0^2 \left(-\nu + \gamma - \Delta\psi + \int_0^\nu i_{k2}^* dv - \int_0^{\gamma - \Delta\psi} i_{k2}^* dv \right) / 2 + u_{C1}(0)_*$$

В конце участка при $\nu = (\gamma - \Delta\psi)$

$$u_{C\Delta^*(8)к} = u_{C1}(0)_*$$

Участок 9:

$$0 \leq \nu \leq (2\pi/3 - \gamma); \quad i_{C^*} = 0;$$

$$u_{C\Delta^*(9)} = u_{C1}(0)_*$$

Начальное значение коммутирующего напряжения на первом участке $u_{C1}(0)_*$ определим из условия, что кривая $u_C(\nu)_*$ не содержит постоянной составляющей, т.е. ее среднее значение за период равно нулю. Выполнив расчет, подробности которого ввиду громоздкости здесь не приведены, получим

$$u_{C1}(0)_* = X_\gamma \omega_0^2 \left(-\gamma + \Delta\psi + \int_0^{\Delta\psi} i_{k1}^* dv + \int_0^{\gamma - \Delta\psi} i_{k2}^* dv \right) / 2.$$

Подобно изложенному выполнено решение по участкам для третьего и пятого диапазонов задержки и определено начальное значение коммутирующего напряжения на первом участке $u_{C1}(0)_*$. При этом получено:

— для третьего диапазона задержки

$$u_{C1}(0)_* = X_\gamma \omega_0^2 \left(2\pi/3 - \gamma + \int_0^{\Delta\psi} i_{k1}^* dv + \int_0^{\gamma - \Delta\psi} i_{k2}^* dv \right) / 2;$$

— для пятого диапазона задержки

$$u_{C1}(0)_* = X_\gamma \omega_0^2 \left(2\pi/3 - \gamma - \Delta\psi + \int_0^{\Delta\psi} i_{k1}^* dv + \int_0^{\gamma - \Delta\psi} i_{k2}^* dv \right) / 2.$$

Три последних выражения можно обобщить,

записав их в следующем виде:

$$u_{C1}(0)_* = X_\gamma \omega_0^2 \left(N - \gamma + \int_0^{\gamma} i_{k1}^* dv + \int_0^{(1-n)\gamma} i_{k2}^* dv \right) / 2. \quad (2)$$

Используя (2), необходимо учитывать, что:

$$\begin{aligned} \text{на Д31} \quad N &= n\gamma; \\ \text{на Д33} \quad N &= 2\pi/3; \\ \text{на Д35} \quad N &= 2\pi/3 - n\gamma. \end{aligned} \quad (3)$$

Обратим также внимание и на то, что величину задержки коммутации в тиристорах по отношению к коммутации в силовых вентилях ($\Delta\Psi$) более удобно задавать через величину угла коммутации силовых вентилей и коэффициент n ($\Delta\Psi = n\gamma$). Значение $n=0$ соответствует отсутствию задержки коммутации в тиристорах по отношению к началу коммутации в силовых вентилях. Если $n=1$, то коммутация в тиристорах сдвинута по отношению к коммутации в силовых вентилях на величину угла коммутации γ .

Теперь выполним расчет для четных диапазонов задержки, начиная с Д32. Как следует из рис. 2, г, кривая тока коммутирующих конденсаторов на этом диапазоне задержки (как и на всех других четных и нечетных ДЗ) состоит из девяти участков. Используя выражение (1) и закономерность изменения тока коммутирующих конденсаторов из [1], получим закономерность изменения коммутирующего напряжения по отдельным участкам.

Участок 1:

$$0 \leq v \leq \gamma; \quad i_{C^*} = -2i_{k1}^*/3;$$

$$u_{C\Delta^*}(1) = -X_\gamma \omega_0^2 \int_0^\gamma i_{k1}^* dv + u_{C1}(0)_*.$$

В конце участка при $v = \gamma$

$$u_{C\Delta^*}(1)_K = -X_\gamma \omega_0^2 \int_0^\gamma i_{k1}^* dv + u_{C1}(0)_*.$$

Участок 2:

$$0 \leq v \leq \Theta; \quad i_{C^*} = -2/3;$$

$$u_{C\Delta^*}(2) = -X_\gamma \omega_0^2 \left(v + \int_0^\gamma i_{k1}^* dv \right) + u_{C1}(0)_*.$$

В конце участка при $v = \Theta$

$$u_{C\Delta^*}(2)_K = -X_\gamma \omega_0^2 \left(\Theta + \int_0^\gamma i_{k1}^* dv \right) + u_{C1}(0)_*.$$

Участок 3:

$$0 \leq v \leq (2\pi/3 - \Theta - \gamma); \quad i_{C^*} = 0;$$

$$u_{C\Delta^*}(3) = -X_\gamma \omega_0^2 \left(\Theta + \int_0^\gamma i_{k1}^* dv \right) + u_{C1}(0)_*.$$

Участок 4:

$$0 \leq v \leq \gamma; \quad i_{C^*} = i_{k1}^*/3;$$

$$u_{C\Delta^*}(4) = X_\gamma \omega_0^2 \left(-\Theta + 0,5 \int_0^\gamma i_{k1}^* dv - \int_0^\gamma i_{k1}^* dv \right) + u_{C1}(0)_*.$$

В конце участка при $v = \gamma$

$$u_{C\Delta^*}(4)_K = X_\gamma \omega_0^2 \left(-\Theta - 0,5 \int_0^\gamma i_{k1}^* dv \right) + u_{C1}(0)_*.$$

Участок 5:

$$0 \leq v \leq \Theta; \quad i_{C^*} = 1/3;$$

$$u_{C\Delta^*}(5) = X_\gamma \omega_0^2 \left(v/2 - \Theta - 0,5 \int_0^\gamma i_{k1}^* dv \right) + u_{C1}(0)_*.$$

В конце участка при $v = \Theta$

$$u_{C\Delta^*}(5)_K = -X_\gamma \omega_0^2 \left(\Theta + \int_0^\gamma i_{k1}^* dv \right) / 2 + u_{C1}(0)_*.$$

Участок 6:

$$0 \leq v \leq (2\pi/3 - \Theta - \gamma); \quad i_{C^*} = 0;$$

$$u_{C\Delta^*}(6) = -X_\gamma \omega_0^2 \left(\Theta + \int_0^\gamma i_{k1}^* dv \right) / 2 + u_{C1}(0)_*.$$

Участок 7:

$$0 \leq v \leq \gamma; \quad i_{C^*} = i_{k1}^*/3;$$

$$u_{C\Delta^*}(7) = X_\gamma \omega_0^2 \left(-\Theta + \int_0^\gamma i_{k1}^* dv - \int_0^\gamma i_{k1}^* dv \right) / 2 + u_{C1}(0)_*.$$

В конце участка при $v = \gamma$

$$u_{C\Delta^*}(7)_K = -X_\gamma \omega_0^2 \Theta / 2 + u_{C1}(0)_*.$$

Участок 8:

$$0 \leq v \leq \Theta; \quad i_{C^*} = 1/3;$$

$$u_{C\Delta^*}(8) = X_\gamma \omega_0^2 (v - \Theta) / 2 + u_{C1}(0)_*.$$

В конце участка при $v = \Theta$

$$u_{C\Delta^*}(8)_K = u_{C1}(0)_*.$$

Участок 9:

$$0 \leq v \leq (2\pi/3 - \Theta - \gamma); \quad i_{C^*} = 0;$$

$$u_{C\Delta^*}(9) = u_{C1}(0)_*.$$

Как и в расчете для нечетных диапазонов задержки, начальное значение коммутирующего напряжения на первом участке второго диапазона задержки $u_{C1}(0)_*$ определим из условия, что кривая $u_C(v)_*$ не содержит постоянной составляющей. Достаточно громоздкий расчет, подробности которого здесь не приведены, дает

$$u_{C1}(0)_* = X_\gamma \omega_0^2 \left(\Theta + \int_0^\gamma i_{k1}^* dv \right) / 2$$

Аналогично предыдущему выполним решение по участкам для четвертого и шестого диапазонов задержки, а затем определим $u_{C1}(0)_*$.

Для четвертого диапазона задержки

$$u_{C1}(0)_* = X_\gamma * \omega_0^2 * \left(2\pi/3 - \gamma + \int_0^\gamma i_{k1} * dv \right) / 2$$

Для шестого диапазона задержки

$$u_{C1}(0)_* = X_\gamma * \omega_0^2 * \left(2\pi/3 - 2\gamma - \Theta + \int_0^\gamma i_{k1} * dv \right) / 2$$

Три последних выражения могут быть записаны в обобщенной форме следующим образом:

$$u_{C1}(0)_* = X_\gamma * \omega_0^2 * \left(N + \int_0^\gamma i_{k1} * dv \right) / 2 \quad (4)$$

Используя (4), необходимо учитывать, что:

$$\begin{aligned} \text{на ДЗ2} \quad N &= n \left(2\pi/3 - \gamma \right); \\ \text{на ДЗ4} \quad N &= \left(2\pi/3 - \gamma \right); \\ \text{на ДЗ6} \quad N &= 2\pi/3 - 2\gamma - n \left(2\pi/3 - \gamma \right) \end{aligned} \quad (5)$$

В записи коэффициентов N учтено, что $0 \leq \Theta \leq (2\pi/3 - \gamma)$ и его так же, как и $\Delta\Psi$ на нечетных диапазонах задержки, лучше задавать как относительную величину от возможного изменения Θ , т.е.

$$\Theta = n \left(2\pi/3 - \gamma \right)$$

Сам же коэффициент n , как и для нечетных диапазонов задержки, может принимать значения от нуля до единицы.

Подставив найденное выражение начального значения коммутирующего напряжения $u_{C1}(0)_*$ в закономерности изменения коммутирующего напряжения на отдельных участках, получим выражения для мгновенного значения коммутирующего напряжения на всех участках всех диапазонов задержки. Однако расчет и построение указанных кривых предусматривает знание величины угла коммутации силовых вентилях γ и их свободно устанавливающегося опережающего угла регулирования α .

Во всех компенсационных преобразовательных системах с одноступенчатой емкостной коммутацией для нахождения указанных углов необходимо составить и решить систему двух трансцендентных уравнений.

Сначала выполним решение для нечетных диапазонов задержки. Первое уравнение запишем из условия, что в конце интервала коммутации силового вентиля относительное значение тока коммутации $i_{k*} = 1$. Как показано в [1], на нечетных диапа-

зонах задержки коммутация идет в два этапа, поэтому весь интервал коммутации разбит на два подинтервала, каждому из которых соответствует своя закономерность изменения тока коммутации, представленная приведенными ниже соотношениями (6) и (7):

$$i_{k1}* = n_1 + \frac{\cos(\nu - \alpha)}{X_\gamma * (\omega_0^2 * - 1)} + K_1 * \cos \omega_0 * \nu + K_2 * \sin \omega_0 * \nu$$

где

$$K_1* = - \left[\frac{\cos \alpha}{X_\gamma * (\omega_0^2 * - 1)} \right]; \quad K_2* = - \frac{\sin \alpha}{\omega_0 * X_\gamma * (\omega_0^2 * - 1)}$$

$$i_{k2}* = n_2 + \frac{\cos(\nu - \alpha + n\gamma)}{X_\gamma * (\omega_0^2 * - 1)} + B_1 * \cos \omega_0 * \nu + B_2 * \sin \omega_0 * \nu,$$

где

$$\begin{aligned} B_1* &= n_1 - n_2 + K_1 * \cos \omega_0 * n_3 \gamma + K_2 * \sin \omega_0 * n_3 \gamma; \\ B_2* &= -K_1 * \sin \omega_0 * n_3 \gamma + K_2 * \cos \omega_0 * n_3 \gamma. \end{aligned}$$

Численные значения коэффициентов n_1 и n_2 , зависящие от номера диапазона задержки, приведены в таблице.

Номер	1	2	3	4	5	6
n_1	0	0	0,5	0,5	1,0	1,0
n_2	1,0	-	0	-	0,5	-

Обратим внимание на два обстоятельства. Первое состоит в том, что в компенсационной преобразовательной системе с ключевыми элементами в коммутирующем звене одноступенчатая емкостная коммутация может быть многоэтапной, что объясняется наличием в коммутирующем звене элементов, способных регулировать процесс перезаряда конденсаторной батареи. Соответственно в такой преобразовательной системе электромагнитный процесс имеет более сложную физическую природу, а сама система обладает более широкими возможностями для регулирования выпрямленного напряжения и реактивной мощности.

Во-вторых, окончанию коммутации на нечетных диапазонах задержки соответствует конец второго подинтервала. Подставив в выражение (7) значение текущей переменной $\nu = \gamma - \Delta\Psi = (1 - n)\gamma$, получим

$$\begin{aligned} &= n_2 + \frac{\cos(\gamma - \alpha)}{X_\gamma * (\omega_0^2 * - 1)} + B_1 * \cos \omega_0 * (1 - n) \gamma + \\ &+ B_2 * \sin \omega_0 * (1 - n) \gamma \end{aligned}$$

Второе трансцендентное уравнение запишем из условия, что в момент начала коммутации $u_{C1}(0)_* = \sin \alpha$. Используя уравнение (2), полу-

чим

$$\sin\alpha = X_\gamma \cdot \omega_0^2 \left(N - \gamma + \int_{k_1}^{\nu} i_{k1} \cdot dv + \int_0^{(1-n)\gamma} i_{k2} \cdot dv \right) / 2$$

Вычислив предварительно значения интегралов, входящих в последнее выражения, и выполнив необходимые математические преобразования, получим окончательно систему уравнений следующего вида:

$$F1_{нч} = -1 + n_2 + \frac{\cos(\gamma - \alpha)}{X_\gamma \cdot (\omega_0^2 - 1)} + B_1 \cdot \cos\omega_0 \cdot (1-n)\gamma + B_2 \cdot \sin\omega_0 \cdot (1-n)\gamma \quad (8)$$

$$F2_{..} = N - \frac{\sin\alpha}{X_\gamma \cdot \omega_0^2} + \frac{\sin(\gamma - \alpha) + \sin\alpha}{2X_\gamma \cdot (\omega_0^2 - 1)} - \gamma/2 + n_1 n \gamma/2 + n_2 (1-n)\gamma/2 + \left[B_1 \cdot \sin\omega_0 \cdot (1-n)\gamma + B_2 \cdot \left[1 - \cos\omega_0 \cdot (1-n)\gamma \right] \right] / 2\omega_0 + \left[K_1 \cdot \sin\omega_0 \cdot n\gamma + K_2 \cdot \left(1 - \cos\omega_0 \cdot n\gamma \right) \right] / 2\omega_0$$

Решив эту систему, определим значения углов α и γ , соответствующих любому режиму работы преобразовательной системы на нечетных диапазонах задержки.

Систему трансцендентных уравнений для определения углов регулирования и коммутации в режимах, соответствующих четным диапазонам задержки, составим, используя те же условия, что и на нечетных диапазонах задержки. При этом учтем, что на четных диапазонах задержки коммутационный процесс является одноэтапным и ток коммутации описывается соотношением (6). Подставив в него значение текущей переменной $\nu = \gamma$, получим

$$1 = n_1 + \frac{\cos(\gamma - \alpha)}{X_\gamma \cdot (\omega_0^2 - 1)} + K_1 \cdot \cos\omega_0 \cdot \gamma + K_2 \cdot \sin\omega_0 \cdot \gamma$$

Второе трансцендентное уравнение запишем из условия, что в момент начала коммутации $u_{C1}(0) = \sin\alpha$. Используя уравнение (4), получим

$$\sin\alpha = X_\gamma \cdot \omega_0^2 \left(N + \int_{k_1}^{\gamma} i_{k1} \cdot dv \right) / 2$$

Предварительно проинтегрировав выражение тока коммутации на первом подинтервале и вы-

полнив необходимые математические преобразования, получим

$$F1_{ч} = -1 + n_1 + \frac{\cos(\gamma - \alpha)}{X_\gamma \cdot (\omega_0^2 - 1)} + K_1 \cdot \cos\omega_0 \cdot \gamma + K_2 \cdot \sin\omega_0 \cdot \gamma; \quad (9)$$

$$F2_{..} = N - \frac{\sin\alpha}{X_\gamma \cdot \omega_0^2} + \frac{\sin(\gamma - \alpha) + \sin\alpha}{2X_\gamma \cdot (\omega_0^2 - 1)} + n_1 \gamma/2 + \left[K_1 \cdot \sin\omega_0 \cdot \gamma + K_2 \cdot \left(1 - \cos\omega_0 \cdot \gamma \right) \right] / 2\omega_0$$

Решив эту систему уравнений, определим значения углов α и γ , соответствующих любому режиму работы преобразовательной системы на четных диапазонах задержки.

Выводы. 1. Включение в состав коммутирующего звена управляемых ключевых элементов существенно изменяет характер электромагнитного процесса преобразовательной системы, поскольку процесс коммутации тока силовыми вентилями усложняется и становится многоэтапным.

2. Закономерность изменения тока коммутирующих конденсаторов и коммутирующего напряжения отличается от аналогичных зависимостей, имеющих место в компенсационных преобразовательных системах с пассивным коммутатором. Указанные характеристики претерпевают значительные изменения как по форме, так и по величине при изменении тока нагрузки и регулирования ключевых элементов.

3. Усложняется расчет параметров элементов такой преобразовательной системы и ее энергетических характеристик, которыми являются внешняя характеристика и величина генерируемой или потребляемой реактивной мощности. Обязательным условием в этих расчетах является знание угла коммутации γ и свободно устанавливающегося опережающего угла регулирования α силовых вентилях.

1. Бойко В.С., Кудря Е.А., Потяженко И.А., Шуляк А.А. Электромагнитный процесс в компенсационной преобразовательной системе с регулируемым коммутирующим устройством // Техн. электродинамика. — 2008. — № 3. — С. 37—42.

2. Чиженко И.М. Схема преобразования электрического тока "звезда—прямая и обратная звезды с уравнительными катушками и коммутирующими конденсаторами" // Изв. КПИ (том XXII). — 1957. — С. 179—200.

3. А.с. 1175338 СССР, МКИ Н 02 М 7/68. Компенсационный выпрямитель (его варианты) / И.М.Чиженко, В.С.Бойко, Е.А.Кудря, А.А.Шуляк (СССР). — № 3707722/24-07. Заявлено 07.03.84. // Б.И. — 1985. — № 31.

Надійшла 02.10.2008