

## РЕЖИМЫ ПУСКА И ТЯГИ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА С УЧЕТОМ ТРЕХФАЗНОГО МОСТОВОГО ВЫПРЯМИТЕЛЬНО-ИНВЕРТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ТЯГОВОЙ ПОДСТАНЦИИ

Рассматривается единая выпрямительно-инверторная преобразовательная система тяговой подстанции по трехфазной мостовой схеме, нагруженный на тяговый двигатель постоянного тока электровоза с широтно-импульсным управлением [1,4,5].

Проведено математическое и компьютерное моделирование электромагнитных и электромеханических процессов при пуске и тяги электроподвижного состава (ЭПС).

Разработанная полупроводниковая преобразовательная система [1] состоит из: сети переменного напряжения 10 кВ; трехфазного тягового трансформатора; ведомую сетью трехфазного инвертора; контактной сети постоянного напряжения 3,3 кВ; трехфазного мостового выпрямителя тягового двигателя с широтно-импульсным управлением ЭПС; рельса; шин отсоса и бетонных реакторов.

Для расчета характеристик агрегатов и электромагнитных переходных процессов в их схемах необходимо знать параметры тяговых трансформаторов, индуктивности и сопротивления, сосредоточенные в анодных цепях. Для точного описания процессов при пуске и в режиме тяги ЭПС в выпрямительном режиме необходимо рассматривать весь комплекс установки, как единая преобразовательная система, начиная от сети переменного напряжения 10 кВ тяговой подстанции, кончая до тягового двигателя постоянного тока электровоза с учетом контактной сети и рельсовой цепи.

Необходимо составить систему дифференциальных уравнений для расчетных схем (рис. 1 ÷ рис. 2). В этих схемах учтено состояние транзисторного ключа 35 как во внекоммутиционном, так и в коммутационном интервалах времени.

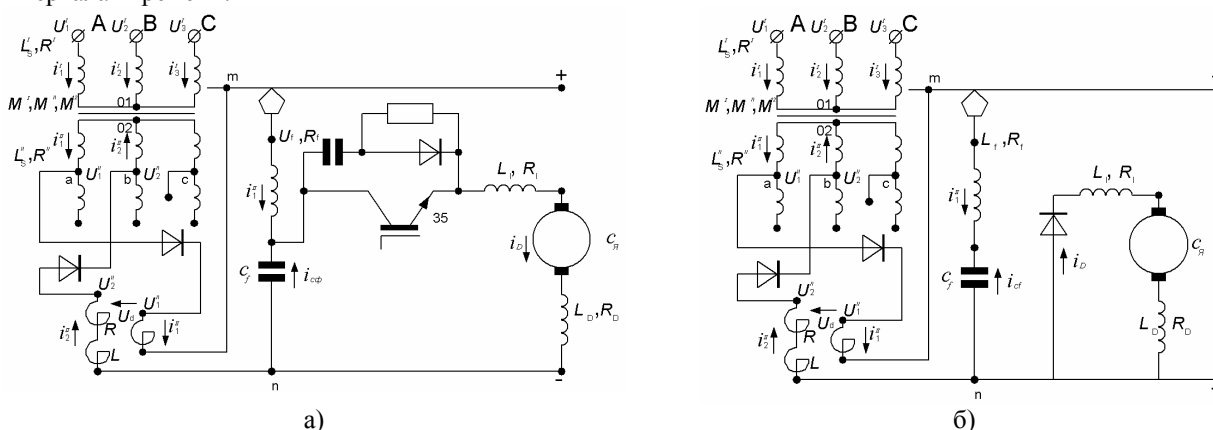


Рис. 1. Расчетная схема преобразовательной системы при пуске и в режиме тяги ЭПС при включении  $t = t_{n-1}$  а) и при выключении  $t = \tau_1$  б) транзисторного ключа 35 во внекоммутиционных интервалах времени.

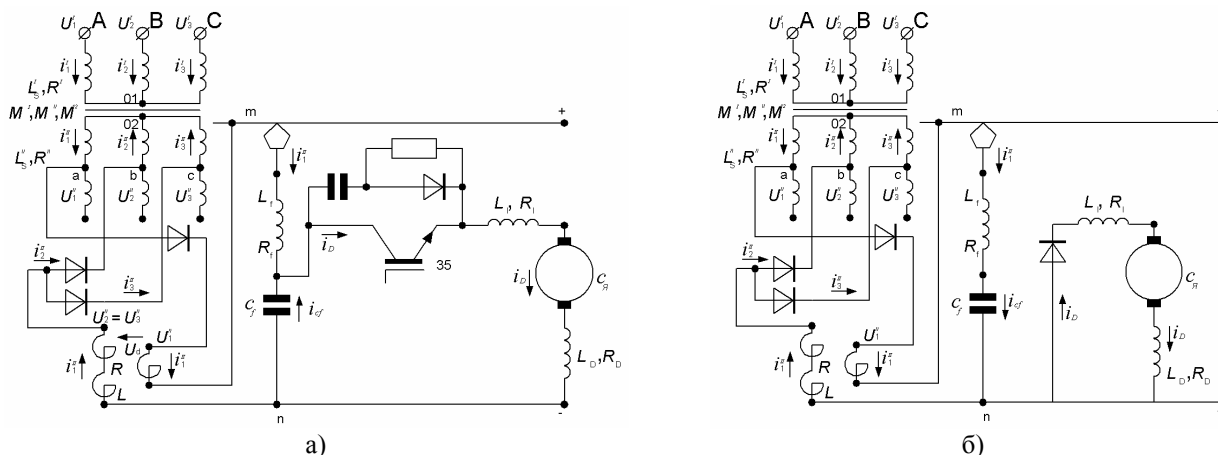


Рис. 2. Расчетная схема преобразовательной системы при пуске и в режиме тяги ЭПС при включении  $t = t_n$  а) и при  $t = \tau_2$  выключении б) транзисторного ключа 35 в коммутационных интервалах времени.

Для расчетных схем пуска и тяги ЭПС (транзисторный ключ 35) имеем соотношения:

Внекоммутационный интервал				Коммутационный интервал			
включение (рис. 1, а)		выключение (рис. 1, б)		включение (рис. 2, а)		выключение (рис. 2, б)	
от	до	от	до	от	до	от	до
$t_{n-1} = \frac{(n-1)}{\omega} \left( \frac{\pi}{3} - \gamma \right)$	$t = \tau_1$	$t = \tau_1$	$t_n = \frac{1}{\omega} \left[ n \left( \frac{\pi}{3} - \gamma \right) \right]$	$t_n = \frac{1}{\omega} \left[ n \left( \frac{\pi}{3} - \gamma \right) \right]$	$t = \tau_2$	$t = \tau_2$	$t_{n+1} = \frac{1}{\omega} \left[ n \left( \frac{\pi}{3} - \gamma \right) + \gamma \right]$

Для каждой расчетной схемы составляются уравнения электрического равновесия по мгновенным значениям переменных. В уравнениях учитываются значения заданных величин параметров полной цепи, указанные в соответствующих схемах:  $U_k^I$  ( $k=1,2,3$ ),  $L_s^I, L_s^{II}$ ,  $M^I, M^{II}$ ,  $M^{12}, R^I, R^{II}$ ,  $R^{12}$ ,  $L, L_f, L_l, L_D, C_f, R_f, R_l, R_D$  и эквивалентная механическая емкость якоря тягового двигателя в переходных режимах машины постоянного тока [2,3]  $C_{я}$ :

от  $t = t_{n-1} = \frac{1}{\omega} (n-1) \left( \frac{\pi}{3} - \gamma \right)$  до  $t = \tau_1$  (рис. 1, а) имеем уравнения:

$$\begin{aligned}
 u_k^I &= i_k^I R^I + \frac{d\psi_k^I}{dt}; \quad u_k^I = U_m^I \sin \left[ \alpha t + \varphi + (k-1) \frac{2\pi}{3} \right]; \quad (k=1,2,3); \\
 (-1)^k u_k^{II} &= i_k^{II} R^{II} + \frac{d\psi_k^{II}}{dt}; \quad (k=1,2); \\
 \psi_k^I &= L_s^I i_k^I + \sum_{m=1}^3 M^I i_m^I \cos(\alpha_m^I - \alpha_k^I) + \sum_{n=1}^2 M^{12} i_n^{II} \cos(\alpha_n^{II} - \alpha_k^I); \quad (k=1,2,3); \\
 \psi_k^{II} &= L_s^{II} i_k^{II} + \sum_{n=1}^2 M^{II} i_n^{II} \cos(\alpha_n^{II} - \alpha_k^{II}) + \sum_{m=1}^3 i_m^I M^{12} \cos(\alpha_m^I - \alpha_k^{II}); \quad (k=1,2); \\
 u_d &= u_{12}^{II} = u_1^{II} - u_2^{II} = i_1^{II} (R + R_f) + 2R i_2^{II} + i_D (R_l + R_D) + (L + L_f) \frac{di_1^{II}}{dt} + 2L \frac{di_2^{II}}{dt} + (L_l + L_D) \frac{di_D}{dt} + \frac{1}{C_{я}} \int_{t_{n-1}}^{\tau_1} i_D dt; \\
 i_D (R_l + R_D) &+ (L_l + L_D) \frac{di_D}{dt} + \frac{1}{C_f} \int_{t_{n-1}}^{\tau_1} i_{C\Phi} dt + \frac{1}{C_{я}} \int_{t_{n-1}}^{\tau_1} i_D dt = 0; \quad i_1^{II} + i_{C\Phi} = i_D; \quad i_1^I + i_2^I + i_3^I = 0;
 \end{aligned} \tag{1}$$

от  $t = \tau_1$  до  $t = t_n = \frac{1}{\omega} \left[ n \left( \frac{\pi}{3} - \gamma \right) \right]$  (рис. 1, б) имеем:

$$\begin{aligned}
 u_k^I &= i_k^I R^I + \frac{d\psi_k^I}{dt}; \quad u_k = U_m^I \sin \left[ \alpha t + \varphi + (k-1) \frac{2\pi}{3} \right]; \quad (k=1,2,3); \\
 (-1)^k u_k^{II} &= i_k^{II} R^{II} + \frac{d\psi_k^{II}}{dt}; \quad (k=1,2); \\
 \psi_k^I &= L_s^I i_k^I + \sum_{m=1}^3 M^I i_m^I \cos(\alpha_m^I - \alpha_k^I) + \sum_{n=1}^2 M^{12} i_n^{II} \cos(\alpha_n^{II} - \alpha_k^I); \quad (k=1,2,3); \\
 \psi_k^{II} &= L_s^{II} i_k^{II} + \sum_{n=1}^2 M^{II} i_n^{II} \cos(\alpha_n^{II} - \alpha_k^{II}) + \sum_{m=1}^3 i_m^I M^{12} \cos(\alpha_m^I - \alpha_k^{II}); \quad (k=1,2); \\
 u_d &= u_{12}^{II} = u_1^{II} - u_2^{II} = i_1^{II} (R + R_f) + 2R \cdot i_2^{II} + (L + L_f) \frac{di_1^{II}}{dt} + 2L \frac{di_2^{II}}{dt} + \frac{1}{C_f} \int_{\tau_1}^{t_n} i_{cf} dt; \\
 i_1^{II} - i_2^{II} &= 0; \quad i_1^I + i_2^I + i_3^I = 0; \quad i_D (R_l + R_D) + (L_l + L_D) \frac{di_D}{dt} + \frac{1}{C_{я}} \int_{\tau_1}^{t_n} i_D dt = 0;
 \end{aligned} \tag{2}$$

от  $t = t_n = \frac{1}{\omega} \left[ n \left( \frac{\pi}{3} - \gamma \right) \right]$  до  $t = \tau_2$  имеем (рис. 2,а):

$$u_k^I = i_k^I R^I + \frac{d\psi_k^I}{dt}; u_k^I = U_m^I \sin \left[ \alpha + \varphi + (k-1) \frac{2\pi}{3} \right]; (k=1,2,3)$$

$$(-1)^k u_k^{II} = i_k^{II} R^{II} + \frac{d\psi_k^{II}}{dt}; (k=1,2,3); u_2^{II} = u_3^{II};$$

$$\psi_k^I = L_s^I i_k^I + \sum_{m=1}^3 M^I \cos(\alpha_m^I - \alpha_k^I) i_m^I + \sum_{n=1}^3 M^{12} \cos(\alpha_n^{II} - \alpha_k^I) i_n^{II}; (k=1,2,3);$$

$$\psi_k^{II} = L_s^{II} i_k^{II} + \sum_{m=1}^3 M^{II} \cos(\alpha_m^{II} - \alpha_k^{II}) i_m^{II} + \sum_{n=1}^3 M^{12} \cos(\alpha_n^I - \alpha_k^{II}) i_n^I; (k=1,2,3); \quad (3)$$

$$u_d = u_1^{II} - u_2^{II} = u_1^{II} - u_3^{II} = i_1^{II} (R_f + 3R) + i_D (R_l + R_D) + (L_f + 3L) \frac{di_1^{II}}{dt} + (L_l + L_D) \frac{di_D}{dt} + \frac{1}{C_{Я}} \int_{t_n}^{\tau_2} i_D dt;$$

$$i_1^{II} - i_2^{II} - i_3^{II} = 0; i_1^{II} + i_{cf} - i_D;$$

$$0 = i_D (R_l + R_D) + (L_l + L_D) \frac{di_D}{dt} + \frac{1}{C_f} \int_{t_n}^{\tau_2} i_{cf} dt + \frac{1}{C_{Я}} \int_{t_n}^{\tau_2} i_D dt;$$

от  $t = \tau_2$  до  $t = t_{n+1} = \frac{1}{\omega} \left[ n \left( \frac{\pi}{3} - \gamma \right) + \gamma \right]$  (рис. 2,б) имеем уравнения:

$$u_k^I = i_k^I R^I + \frac{d\psi_k^I}{dt}; u_k^I = U_m^I \sin \left[ \alpha + \varphi + (k-1) \frac{2\pi}{3} \right]; (k=1,2,3);$$

$$(-1)^k u_k^{II} = i_k^{II} R^{II} + \frac{d\psi_k^{II}}{dt}; (k=1,2,3); u_2^{II} = u_3^{II};$$

$$\psi_k^I = L_s^I i_k^I + \sum_{m=1}^3 M^I \cos(\alpha_m^I - \alpha_k^I) i_m^I + \sum_{n=1}^3 M^{12} \cos(\alpha_n^{II} - \alpha_k^I) i_n^{II}; (k=1,2,3); \quad (4)$$

$$\psi_k^{II} = L_s^{II} i_k^{II} + \sum_{m=1}^3 M^{II} \cos(\alpha_m^{II} - \alpha_k^{II}) i_m^{II} + \sum_{n=1}^3 M^{12} \cos(\alpha_n^I - \alpha_k^{II}) i_n^I; (k=1,2,3);$$

$$u_d = u_1^{II} - u_2^{II} = u_1^{II} - u_3^{II} = i_1^{II} (R + R_f + 2R) + (L_f + 3L) \frac{di_1^{II}}{dt} + \frac{1}{C_f} \int_{\tau_2}^{t_{n+1}} i_{cf} dt; i_1^{II} - i_2^{II} - i_3^{II} = 0;$$

$$0 = i_D (R_l + R_D) + L_D \frac{di_D}{dt} + \frac{1}{C_{Я}} \int_{\tau_2}^{t_{n+1}} i_D dt$$

Применением комплексного преобразования переменных исходные систем уравнения (1)-(4) преобразуются в систему уравнений относительно результирующих комплексных обмоточных токов тягового трансформатора. При этом количество уравнений уменьшается до числа обмоточных токов.

В общем виде для результирующих комплексных величин введем следующие выражения [6]:

$$\dot{F} = \sum_{k=1}^3 f_k e^{j\alpha k}; f_k = \frac{1}{3} \left( \dot{F} e^{-j\alpha k} + F^* e^{j\alpha k} \right); f_k = \frac{2}{3} (F_d \cos \alpha_k + F_q \sin \alpha_k); (k=1,2,3); \quad (5)$$

где  $\alpha_k$  ( $k=1,2,3$ ) – углы, определяемые магнитными осями фаз силового трансформатора. В (5) использованы матрицы прямых и обратных преобразования переменных.

Из систем комплексных уравнений можно получить скалярные уравнения для действительных  $F_d$  и мнимых  $F_q$  составляющих результирующих величин по осям  $d, q$  с целью дальнейшего решения задач методом компьютерного моделирования [3].

$$\left[ \sum_k^n u_k \right] = [L_k] \cdot [dI_k / dt], \quad (6)$$

где в (6)  $\left[ \sum_{k=1}^n u_k \right]$  – матрица падения мгновенных значений напряжений на эквивалентных сопротивлениях полной цепи;  $[L_k]$  – матрица эквивалентных индуктивностей и взаимных индуктивностей;  $[dI_k/dt]$  – матрица производных результирующих токов в координатах  $d, q$ .

Из (6) можно получить выражения матриц результирующих токов  $[I_k]$  во всех обобщенных интервалах времени:  $t_{n-1} \leq t \leq \tau_1$ ;  $\tau_1 \leq t \leq t_n$ ;  $t_n \leq t \leq \tau_2$ ;  $\tau_2 \leq t \leq t_{n+1}$ ;

$$I_k = \int_{t_1}^{t_2} [L_k]^{-1} \left[ \sum_k u_k \right] dt + I_k(0), \quad (7)$$

где в (7)  $[L_k]^{-1}$  – обратная матрица эквивалентных индуктивностей и взаимоиндуктивностей;  $I_k(0)$  – начальные значения соответствующих результирующих токов в координатах  $d, q$  в начале каждого внекоммутационного и коммутационного интервалов времени.

На основании (5), (7) можно составить структурную схему модели переходных процессов преобразователя для каждого интервала времени с учетом наборов моделирующих элементов отдельных элементарных математических операций с выполнением требуемых условий их сопряжения [3,6].

Полученная структурная модель даст возможность исследовать и рассчитать электромагнитные и электромеханические переходные процессы во всех основных режимах работы в обобщенных внекоммутационных и коммутационных интервалах времени.

Рабочий цикл преобразовательной системы можно представить как чередование рассмотренных интервалов времени [6].

Для предложенной преобразовательной системы разработан алгоритм математического и компьютерного моделирования процессов в разных режимах работы системы в целом.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кохреидзе Г.К., Лаошвили Д.П., Кохреидзе Д.К., Курашвили И.А. Трехфазный мостовой выпрямительно-инверторный преобразователь с широтно-импульсным управлением тягового двигателя постоянного тока. [www.energyonline.ge](http://www.energyonline.ge) №1(2) 2010.
2. Кохреидзе Г., Курашвили И., Инджия Л. Математическое и компьютерное моделирование внекоммутационных процессов в преобразователях тяговой подстанции по схеме «две обратные звезды с уравнительным реактором». «Энергия» №4(52) 2009. Тбилиси.
3. Кохреидзе Г., Инджия Л., Курашвили И. Математическое и компьютерное моделирование коммутационных процессов в полупроводниковых преобразователях тяговой подстанции с двухфазным уравнительным реактором. «Энергия». №4(52) 2009. Тбилиси.
4. Прохорский А.А. Тяговые и трансформаторные подстанции. М. Транспорт. 1983.
5. Розенфельд В.Е., Исаев И.П., Сидоров Н.Н. Теория электрической тяги. М. Изд-во «Транспорт», 1983.
6. Лутидзе Ш.И. Основы теории электрических машин с управляемым полупроводниковым коммутатором. «Энергия». М. 1968.