

НАУЧНЫЕ ЗАМЕТКИ

В. С. ВАРՈՒՅԵԱՆ

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ И ХОДОВЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ АККУМУЛЯТОРНЫХ ЭЛЕКТРОПОДВИЖНЫХ УСТАНОВОК ПРИ ИМПУЛЬСНО-РЕКУПЕРАТИВНОМ ТОРМОЖЕНИИ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

При разработке многодвигательных электроподвижных установок (ЭПУ) с индивидуальной тягой ведущих колес важное значение имеют исследование и оценка влияния способа управления импульсными преобразователями на энергетические и ходовые показатели установки в режиме импульсно-рекуперативного торможения тяговых двигателей (ТД)

Одной из характерных особенностей ЭПУ с индивидуальной тягой двух ведущих пневмоколес одной оси установки является неравенство угловых скоростей вращения двух ТД, возникающее из-за возможного неравенства динамических радиусов шин ведущих колес при движении ЭПУ по прямолинейной и криволинейной траекториям. К тому же в [1—3] доказано, что в двигательном режиме ТД оптимальным по минимуму потерь энергии в аккумуляторной батарее (АБ) законом несинфазного управления двумя импульсными преобразователями (ИП) является обеспечение временного сдвига между тактами работы двух ИП, равного половине периода импульсного цикла их работы.

Исходя из вышесказанного, исследование производится в случае неравенства скоростей вращения двух ТД постоянного тока, работающих в режиме импульсно-рекуперативного торможения со скважностью работы ИП, равной 0,5, и с учетом влияния зарядового состояния АБ. При этом принимаются следующие допущения: тиристорно-импульсные преобразователи являются идеальными ключами; в течение периода коммутации преобразователей АБ представляет источник с постоянными значениями ε , d , c и внутреннего сопротивления; ТД идентичны по всем параметрам: пульсации скорости и магнитного потока ТД отсутствуют; приемка (аккумуляция) АБ в режиме зарядки при несинфазном и синфазном управлениях импульсно-рекуперативным торможением двух ТД происходит одинаково; циркуляция тока по электрическому контуру, образованному двумя ТД, отсутствует.

Схема замещения системы АБ—ИП—ТД приведена на рис. 1, где L_1 , R_1 , E_0 — соответственно, индуктивность, активное сопротивление

и э. д. с. вращения ТД; $R_{\text{н}}$, E — внутреннее сопротивление и э. д. с. АБ; $D_{1,2}$ — обратные диоды, исключающие питания ТД от АБ и циркуляцию тока между ТД в режиме импульсно-рекуперативного торможения последних.

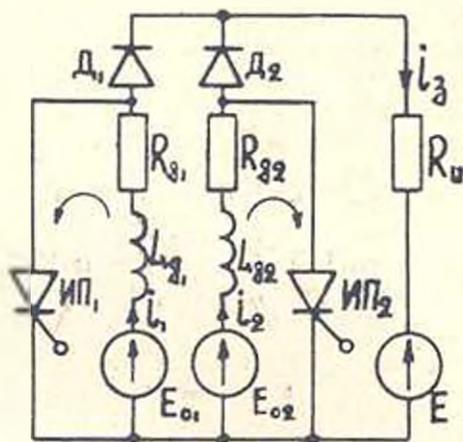


Рис. 1. Схема замещения системы АБ—ИП—ТД при импульсно-рекуперативном торможении ТД.

Введем систему относительных величин:

$$\bar{i} = \frac{iR_A}{E}; \quad g = \frac{R_n}{R_A}; \quad \beta = \frac{T}{T_A}; \quad T_A = \frac{L_A}{R_A}; \quad e = \frac{E_0}{E}; \quad \tau = \frac{t}{T},$$

где i — ток, t — время, T — период коммутации импульсного инкла, одинаковый для обоих ИП.

При несинфазном управлении (НСУ) для обоих ТД имеют место два отдельных режима работы: самовозбуждения и рекуперации (при проводящем и непроводящем состоянии ИП соответствующего ТД).

Уравнения равновесия системы будут:

режим I — самовозбуждение:

$$L_A \frac{di_{1,2}}{dt} + R_A i_{1,2} = E_{01,2}; \quad (1)$$

режим II — рекуперация:

$$L_A \frac{di_{1,2}}{dt} + (R_A + R_n) i_{1,2} = E_{01,2} - E. \quad (2)$$

Постоянные интегрирования находятся по начальным условиям, исходя из непрерывности тока ТД. Решение уравнений (1), (2), соответственно, будет:

$$\bar{i}_{1,2} = \epsilon_{1,2} + A_{1,2} e^{-\beta \tau}; \quad (3)$$

$$i_{1,2} = \lambda_{1,2} + B_{1,2} e^{-(\beta + \beta_n) \tau}, \quad (4)$$

где

$$i_{1,2} = \frac{e_{1,2} - 1}{1 + g}; \quad A_{1,2} = \frac{(1-h)(e_{1,2} - e_{1,2})}{1 - yh};$$

$$B_{1,2} = \frac{(1-y)(e_{1,2} - e_{1,2})}{1 - yh}; \quad v = e^{-2\beta}; \quad h = e^{-2\beta(1-g)}.$$

Разность средних значений токов ТД за период T для случая $e_1 > e_2$ будет равна:

$$\Delta \bar{i}_{cp} = \bar{i}_{cp1} - \bar{i}_{cp2} = \frac{e_1 - e_2}{1 + g} \left[\frac{2 + g}{2} - \frac{g^2(1-y)(1-h)}{2(1-yh)(1+g)} \right]. \quad (5)$$

Очевидно, что для оценки энергетической эффективности целесообразно рассмотреть случай $e_1 = e_2 = e$ ($\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$). При этом среднее значение тока зарядки АБ при НСУ определяется как

$$\bar{i}_{z, cp} = \int_0^{0,5} \bar{i}_1^{II} dz + \int_0^{0,5} \bar{i}_2^{II} dz = \lambda + \frac{2B_1}{\beta} \cdot \frac{1-h}{1-g}, \quad (6)$$

где \bar{i}_1^{II} — токи ТД₁ и ТД₂ в режиме рекуперации.

Средние значения полезной (аккумулированной) \bar{P}_n и полной \bar{P} мощностей (в относительных единицах) в режиме зарядки АБ, соответственно, будут равны:

$$\bar{P}_n = \frac{1}{0,5} \int_0^{0,5} E i_1 dz = \frac{E \cdot i_{z, cp}}{E^2 R_1} = \frac{i_{z, cp} \cdot R_2}{E} = \bar{i}_{z, cp}; \quad (7)$$

$$\bar{P} = \bar{P}_n + \frac{1}{0,5} \int_0^{0,5} \bar{i}_2^2 g dz = \frac{1}{0,5} \int_0^{0,5} (\bar{i}_1^2 + \bar{i}_2^2 g) dz. \quad (8)$$

где \bar{i}_1 , $\bar{i}_{z, cp}$ — мгновенное и среднее значения тока зарядки в относительных единицах; $E^2 R_1$ — базисная величина для выражения мощности в относительных единицах в удобной форме; i_1 , $i_{z, cp}$ — мгновенное и среднее значения тока зарядки в абсолютных единицах.

К. п. д. режима зарядки АБ при НСУ с учетом (4), (6) — (8) будет:

$$\eta_{НСУ} = \frac{\lambda + \frac{2B_1}{\beta} \cdot \frac{1-h}{1-g}}{\lambda + \frac{2B_1}{\beta} \cdot \frac{1-h}{1+g} + g \left(\lambda^2 + \frac{4B_1}{\beta} \cdot \frac{1-h}{1-g} + \frac{B_1^2}{\beta} \cdot \frac{1-h^2}{1+g} \right)} \quad (9)$$

При синфазном управлении (СУ) имеют место два режима: I и II — одновременное самовозбуждение и рекуперация обоих ТД.

Аналогично вышеприведенному определяем разность средних значений токов ТД:

$$\Delta \bar{i}_{cp} = \bar{i}_{cp1} - i_{cp2} = (e_1 - e_2) \left(1 + 2 \frac{1-y}{\beta} \right). \quad (10)$$

Мгновенное значение зарядного тока АБ при СУ и $e_1 = e_2 = e$ в режиме со скважностью работы ИП $\gamma = 0,5$ равно:

$$\bar{i}_3 = \bar{i}_1^0 + \bar{i}_2^0 = 2 \frac{e-1}{1+2g} + 2A_3 e^{-2(1+2g)\tau}, \quad (11)$$

где

$$A_3 = \frac{(1-y) |1 + g(e_1 + e_2)|}{(1+2g)(1-yf)}; \quad f = e^{-2(1+2g)\tau}.$$

При этом средние значения аккумулированной и полной мощностей зарядки определяются, соответственно:

$$\bar{P}_n = \int_0^{0,5} \bar{i}_3 d\tau; \quad (12)$$

$$\bar{P} = \int_0^{0,5} i_3 (1 + g\bar{i}_3) d\tau. \quad (13)$$

К. н. д. зарядки АБ при СУ определяется с учетом (11)–(13):

$$\eta_0 = \frac{i_{3,2} + \frac{2A_3}{\beta} \cdot \frac{1-f}{1+2g}}{i_{3,2} + \frac{2A_3}{\beta} \cdot \frac{1-f}{1+2g} + g \left(2i_{3,2} + \frac{3i_{3,2}A_3}{\beta} \cdot \frac{1-f}{1+2g} + \frac{2A_3^2}{\beta} \cdot \frac{1-f}{1+2g} \right)}, \quad (14)$$

где $i_{3,2} = \frac{e-1}{1+2g}$.

Оценка энергетической эффективности НСУ по сравнению с СУ в режиме зарядки АБ производится с помощью отношения к. н. д.:

$$K_1 = \frac{\eta_{нсу}}{\eta_{су}}. \quad (15)$$

По выражениям (5), (10), (14), (15) на ЦВМ были рассчитаны основные зависимости при следующей вариации параметров: $\beta = 0,1 \div 0,5$; $g = 0,5 - 1,5$; $e_1 = 1$ и $e_2 = 0,5 - 1$; $e_1 = 1,2$ и $e_2 = 0,5 \div 1,2$.

Результаты расчета показывают незначительное влияние частотного параметра β на к. н. д. и на разность токов ТД.

Из полученных результатов (рис. 2) следует, что в случае неравенства скоростей вращения ТД разность их токов при СУ намного больше, чем при НСУ. Наличие существенной разности токов ТД при СУ может привести к неблагоприятному перераспределению тормозных

моментов и сил между ведущими колесами и, тем самым, к ухудшению устойчивости и управляемости ЭПД в режиме торможения, поскольку в этом случае на колесо, вращающееся быстрее из-за неравенства динамических радиусов шин или же радиусов траектории движения, будет действовать относительно большее тормозное усилие.

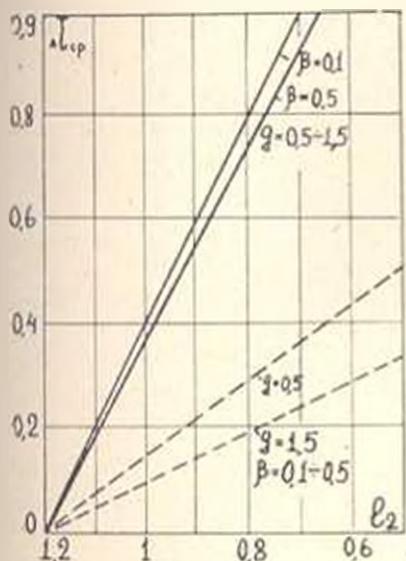


Рис. 2. --- HCV; — CV.

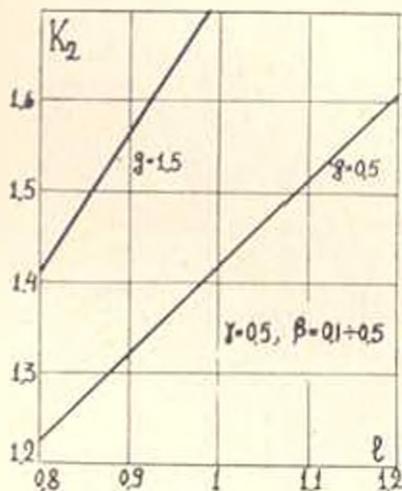


Рис. 3.

Из приведенной на рис. 3 зависимости следует, что в режиме импульсно-рекуперативного торможения ТД к.п.д. зарядки интенсивно возрастает.

Несинфазное управление двухдвигательным электроприводом в режиме импульсно-рекуперативного торможения ТД с автоматическим обеспечением оптимального сдвига между тактами работы двух ИП можно реализовать устройством [4], схема которого приведена на рис. 4.

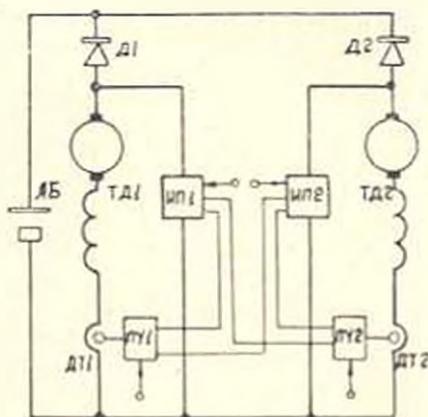


Рис. 4.

Полученные результаты подтверждают эффективность НСУ по энергетическим и ходовым показателям электроподвижных установок в режиме импульсно-рекуперативного торможения многодвигательного электропривода.

ЕрПИ им. К. Маркса

Поступило 18. I. 1979

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. *Бейнрович В. А., Сапожников Л. И.* Об оптимальном управлении системами с многофазной широтно-импульсной модуляцией. «Известия ТПИ», том 243, Томск, 1972.
2. *Варпетян В. С.* Исследование энергетической эффективности несинфазного управления импульсными преобразователями при питании от аккумуляторной батареи. «Известия АН АрмССР (серия Т. Н.)», т. XXVIII, № 3, 1975.
3. Исследование импульсно-управляемого электропривода электромобиля. Науч.-техн. отч. № 586, инв. № Б337323, ЕрПИ, Ереван, 1973.
4. *Варпетян В. С.* Устройство для рекуперативного торможения двухдвигательного привода. Автор. свид. № 650852.