

## ПОСТРОЕНИЕ ДИСКРЕТНОЙ МОДЕЛИ СРЕДНИХ ЗНАЧЕНИЙ КОНТУРА ТОКА ЭЛЕКТРОПРИВОДА ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ЭЛЕКТРОВОЗА С ВЕНТИЛЬНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

*Захаров В.Ю., к.т.н., доц.*

*Национальный транспортный университет*

*Синчук И.О., к.т.н., Захаров В.В., студ.*

*Криворожский технический университет*

*Буйвол Б.А., асп.*

*Кременчугский государственный университет имени Михаила Остроградского*

*ул. Первомайская, 20, 39600, г. Кременчуг, Украина*

*E-mail: [seem@kdu.edu.ua](mailto:seem@kdu.edu.ua)*

Получены математические зависимости расчета квазиустановившихся значений тока в звене постоянного тока вентильного двигателя, которые используют микропроцессоры в контурах управления и регулирования. Использование МП и микроэлектронной вычислительной машины для управления и регулирования электроприводом с ВД из дискретной САК является оптимальным способом регулирования по быстродействию, стойкости и точности, с применением прямо и косвенно действующих датчиков координат.

**Ключевые слова:** вентильный двигатель, контур тока, квазиустановившиеся значения, режим непрерывного и прерывистого тока.

**Введение.** Требования к локомотивам нового поколения ставят задачу создания систем тяговых электротехнических комплексов с высокими технико-экономическими показателями. Основой этого являются бесколлекторные тяговые двигатели с управляемыми полупроводниковыми преобразователями. При этом одним из наиболее ответственных элементов тягового комплекса становится электронная система управления. Сложность и многообразие электромагнитных и механических процессов, происходящих в электротехническом комплексе локомотива, требуют тщательной отработки алгоритмов управления в различных режимах.

Использование систем регулируемого электропривода (ЭП) по схеме “вентильный двигатель” (ВД) все больше распространяется в электротранспорте. В настоящее время внедряются бесконтактные системы ЭП, в том числе ВД. Это обусловлено как известными преимуществами ВД над другими системами ЭП, так и необходимостью принятия мер по энергосбережению при работе рабочих машин и механизмов большой мощности, ЭП которых традиционно содержит синхронный двигатель. Поэтому вопрос теории и практики использования ВД, в том числе вопрос построения систем управления, являются актуальными.

Известны работы по синтезу аналоговой системы управления ВД, в которых объект управления представлен структурой аналоговой системы ТП-Д без учета свойств инвертора преобразователя и возможностей современной микропроцессорной техники [1].

Возможность использования современных микропроцессоров разрешила положить на них функции выделения измеренных величин, расчет задач, организацию связи интерфейса с элементами системы [2].

**Цель работы.** Разработка математической модели звена постоянного тока ВД по средним значениям.

**Материалы и результаты исследования.** Расчет процессов в ВД, вызванных пульсациями выпрямленного напряжения УВ и противо-ЭДС ИН, сводим к решению задачи воздействия периодических несинусоидальных возмущений на линейную часть.

В ВД со звеном постоянного тока будем считать, что управляемый выпрямитель (УВ) и инвертор напряжения (ИН) нагружены на  $R-L$  цепь с активным и индуктивным сопротивлением  $R_{\Sigma}$  и  $L_{\Sigma}$ , равными:

$$L_{\Sigma} = 2L_{\text{тр}} + L_{\text{др}} + 2L_{\text{с}}; R_{\Sigma} = 2R_{\text{тр}} + R_{\text{др}} + 2R_{\text{с}}, (1)$$

где  $R_{\text{тр}}$ ,  $L_{\text{тр}}$ ,  $R_{\text{др}}$ ,  $L_{\text{др}}$ ,  $R_{\text{с}}$ ,  $L_{\text{с}}$  – активные и индуктивные сопротивления трансформатора или питающей сети, сглаживающего дросселя, статора СМ.

Введем систему относительных единиц, приняв в качестве базового напряжения  $U_{\delta}$  амплитуду напряжения  $U_{\text{лм}}$  (для  $m=2$ ), а за базовое сопротивление  $R_{\delta}=R_{\Sigma}$ , за базовую угловую скорость  $\omega_{\delta}=\omega_0$ , где  $\omega_0$  – частота сети.

Тогда в относительных единицах:

$$U_{d*} = \frac{U_d}{U_d} = \cos a = \cos\left(j - \frac{p}{m}\right),$$

где  $a$  – угол управления УВ, отсчитываемый от точки естественной коммутации;  $j$  – угол управления УВ, отсчитываемый от начала синусоиды:

$$I_* = \frac{IR_d}{U_d}; n = \frac{w}{w_0} = \frac{E_n}{U_d}; K_{TMd} = \frac{U_d}{w_d}; K_{TM*} = 1.$$

В такой системе относительных единиц электромеханическая и электромеханические постоянные времени  $T_\Sigma$  и  $T_m$ :

$$T_\Sigma = \frac{L_\Sigma}{R_\Sigma}, T_m = \frac{JR_\Sigma}{K_{\Phi d}^2},$$

где  $J$  – приведенный к валу СД момент инерции.

При расчете квазиустановившихся процессов будем считать, что скорость ВД на интервале дискретности ИН  $T_n$  постоянна, что допустимо для большинства реальных случаев и особенно на интервале дискретности УВ  $T$ . Структурная схема для расчета квазиустановившихся процессов по току в ВД приведена на рис. 1:

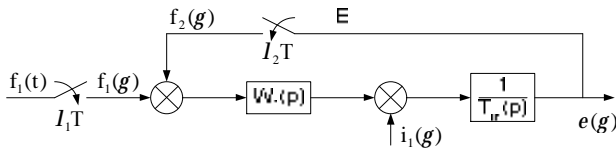


Рисунок 1 – Структурная схема для определения квазиустановившихся процессов в ВД

В цепи выпрямленного тока ВД существуют два режима: режим прерывистого тока (РПТ), когда ток в R-L цепи протекает в течение времени  $t_\lambda = \lambda_0 T$ , и  $\lambda_0 < 1$ , где  $T = \frac{2p}{m w_0}$  – период дискретности УВ, и режим непрерывного тока (РНТ) при  $I_0 = 1$  ( $I_0$  – относительное время  $0 \leq \lambda_0 < 1$ ).

При непрерывном токе ( $\lambda_0 = 1$ ) ключи 1 и 2 замкнуты постоянно, а при прерывистом токе ключи 1 и 2 замыкаются в течение периода дискретности УВ  $T$  на время  $t_\lambda$  (рис. 2).

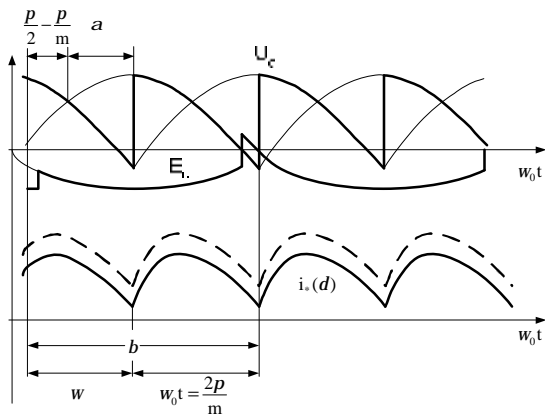


Рисунок 2 – Процессы в ВД в режиме непрерывного тока

В РПТ на вход аperiodического звена подается результирующее возмущение (рис. 3):

$$f_\Sigma(g) = f_1(g) + f_2(g) = \begin{cases} \sin(w_0 T g + j) - n \sin(w_0 T n g + b_0), & 0 < g < I_0 \\ 0, & I_0 \leq g \leq 1 \end{cases}$$

где  $\beta_0$  – фаза противо-ЭДС ИН, зависящая от угла управления.

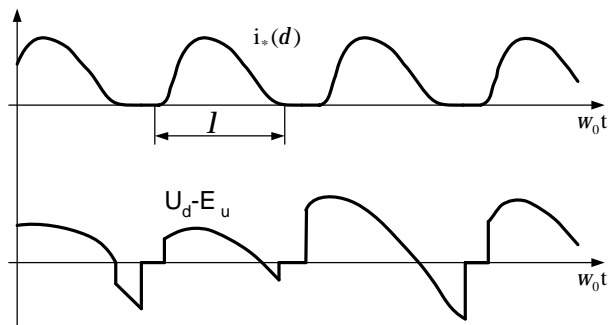


Рисунок 3 – Процессы в ВД в режиме прерывистого тока

При  $\lambda \leq \lambda_0 \leq 1$  отрицательная по знаку ЭДС влияние на звено не оказывает из-за односторонней проводимости вентиля УВ и ИН. Определим ток в R-L цепи, используя методику, описанную в (2).

Передаточная функция R-L цепи  $W_{L(R)} = \frac{1}{T_H P + 1}$

имеет один полюс  $P_1 = -\frac{1}{T_H}$ , то  $TC_1 = 1$ . Тогда

можно записать:

$$i(g) = \begin{cases} TC_1 \frac{d^g}{1-d} \left[ \int_0^g f_\Sigma(t) e^{\frac{T}{T_H} t} dt + d \int_g^{I_0} f_\Sigma(t) e^{\frac{T}{T_H} t} dt \right]; & \text{при } 0 \leq g \leq I_0 \\ TC_1 \frac{d^g}{1-d} \left[ \int_0^g f_\Sigma(t) e^{\frac{T}{T_H} t} dt \right]; & \text{при } 0 \leq g \leq I_0, \end{cases}$$

где  $d = e^{-\frac{T}{T_H}}$ ;

$$C_1 = \frac{A(P_1)}{B'(P_1)} \text{ с учетом } W_L(P) = \frac{A(P)}{B(P)}.$$

Выполняя интегрирование, получаем:

$$i(g) = \begin{cases} \cos q_e \sin(w_0 T g + j - q_e) - n \cos q_u \sin(w_0 T n g + b - q_u) - \frac{d^g}{1-d} \times \\ \times [\cos q_e \sin(j - q_e) - n \cos q_u \sin(b - q_u) - d^{1-l_0} \cos q_e \sin(w_0 T l_0 + j - q_e) + \\ + d^{1-l_0} n \cos q_u \sin(w_0 T n l_0 + b - q_u)] & n p u 0 \leq g \leq l_0 \\ \frac{d^g}{1-d} [d^{-l_0} \cos q_{e0} \sin(w_0 T l_0 + j - q_e) - d^{-l_0} n \cos q_u \sin(w_0 T n l_0 + b - q_u) - \\ - \cos q_e \sin(j - q_e) + n \cos q_u \sin(b - q_u)] & n p u l_0 \leq g \leq 1 \end{cases},$$

где  $\theta_b = \arctg \omega_0 T n$ ;  $\theta_u = \arctg \omega_0 v T n$ ;  $\omega = \omega_0 v$ .

Учитывая, что в РПТ  $i(\gamma)$  при  $\lambda_0 \leq \gamma \leq 1$ , то  $d^{-l_0} \cos \theta_b \sin(\omega_0 T \lambda_0 + \varphi - \theta_b) - d^{-l_0} v \cos \theta_u \sin(\omega_0 T v \lambda_0 + \varphi - \theta_u) = \cos \theta_b (\varphi - \theta_b) - v \cos \theta_u \sin(\beta - \theta_u)$ .

После преобразований и приведения подобных в РНТ окончательно имеем:

$$i(\gamma) = \cos \theta_a \sin(\omega_0 T \gamma + \varphi - \theta_a) - v \cos \theta_u \sin(\omega_0 T v \gamma + \beta - \theta_u) + (2) \\ + d^\gamma [\cos \theta_a \sin(\varphi - \theta_a) - v \cos \theta_u \sin(\beta - \theta_u)].$$

Режим граничного тока может быть определен из условия  $i(0) = i(\lambda_0 = 1) = i(\gamma = 1) = 0$ .

Откуда

$$\cos \theta_a [\sin(\omega_0 T + \varphi - \theta_a) + d \sin(\varphi - \theta_a)] = \\ = v \cos \theta_u [\sin(\omega_0 T v + \beta - \theta_u) + d \sin(\beta - \theta_u)].$$

Полученное уравнение для граничного режима является трансцендентным относительно  $\varphi$ ,  $\beta_0$  и  $v$ .

В РНТ  $\lambda_0 = 1$ , а  $i(\gamma = 0) = i_0$  уравнение (2) примет вид:

$$i(g) = \cos q_b [\sin(w_0 T g + j - q_b) + d^g \sin(j - q_b)] - \\ n \cos q_u [\sin(w_0 T n g + b - q_u) + d^g \sin(b - q_u)] + i_0 d^g. \quad (3)$$

Полученные уравнения для РНТ и РПТ показывают, что ток в звене постоянного тока определяется тремя изменяемыми величинами: углом управления УВ  $\varphi$ ; скоростью вращения СД  $n$  или частотой противо-ЭДС СД и фазой ЭДС ИН  $\beta$ , которая может изменяться в пределах  $\beta_0 \leq \beta \leq \beta_0 + \pi/m$ , где  $b_0$  – угол управления ИН. Поэтому в квазиустановившихся режимах на каждом периоде дискретности УВ из-за различных начальных условий и фазы ЭДС ИН требуется расчет производить с их учетом.

При разработке цифровых систем регулирования по техническим соображениям более целесообразным является переход от мгновенных значений токов к их интегральным (средним) значениям.

Определим среднее значение выпрямленного тока с учетом его текущего значения. Для этого проинтегрируем уравнение тока в РНТ:

$$I_{d, \text{cp}} = \int_0^{l_0} i(g) dg = \int_0^{l_0} \left\{ \begin{aligned} &\cos q_b \sin(w_0 T g + j - q_b) - \\ &- n \cos q_u \sin(w_0 T n g + b - q_u) + \\ &+ d^g [\cos q_b \sin(j - q_b) - n \cos q_u \sin(b - q_u)] \end{aligned} \right\} dg$$

После интегрирования имеем окончательно

выражение, для средних значений выпрямленного тока представленное в виде:

$$I_d = \frac{\cos q_b}{w_0 T} [\cos a_1 - \cos(w_0 T l_0 + a_1)] - \\ - \frac{n \cos q_u}{w_0 T n} [\cos b_1 - \cos(w_0 T n l_0 + b_1)] + \\ + \frac{T n}{T} \left( 1 - d_n^{l_0} \right) [\cos q_b \sin a_1 - n \cos q_u \sin b_1]$$

где  $a_1 = j - q_b$ ,  $b_1 = \beta - q_u$ .

Среднее значение выпрямленного тока за период проводимости вентиля в относительных единицах:

$$I_{\text{срРНТ}} = \frac{m}{2p} \left\{ \begin{aligned} &\cos j + \\ &+ \cos q_b [d^{l_0} \text{tg} q_b \sin a_1 - \cos(w_0 T l_0 + a_1)] - \\ &\cos q_u [(d^{l_0} - 1) \text{tg} q_b \sin b_1 + \cos b_1 - \cos(w_0 T n l_0 + b_1)] - \\ &- i_0 (d^{l_0} - 1) \text{tg} q_b \end{aligned} \right\}$$

где  $\text{tg} q_b = w_0 T_S$ ;  $n = w/w_0$ .

Таким образом, по приведенным выше выражениям можно определить мгновенные и средние значения тока ВД за период дискретности инвертора.

На рис. 4 приведены результаты моделирования переходного процесса по мгновенному току в звене постоянного тока ВД и его средние значения за период дискретности.

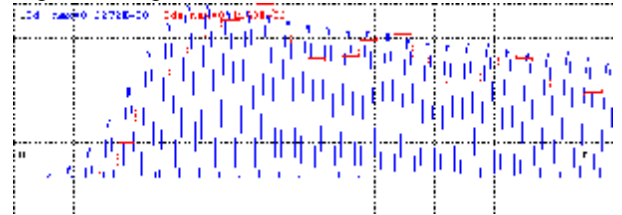


Рисунок 4 – Мгновенный и средний ток в звене постоянного тока вентильного двигателя

**Вывод.** Полученная математическая модель среднего значения выпрямленного тока вентильного двигателя может быть использована при анализе процессов в электроприводе, синтезе регуляторов замкнутых систем управления и создании интерфейса микропроцессорных систем.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Управляемый выпрямитель в системах автоматического управления / [Н. В. Донской и др.]; под ред. А. Д. Поздеева. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 352 с.
2. Файнштейн Э. Г. Микропроцессорные системы управления электроприводами. Э. Г. Файнштейн., В. Г. Файнштейн; под ред. О. В. Слежановского. - М.: Энергоатомиздат, 1986. – 240 с.
3. Захаров В. Ю. Квазиустановившиеся режимы работы вентильного двигателя с управляемым

выпрямителем / В. Ю. Захаров, Ю. Н. Ридько. V Всесоюз. научн.-техн. конф. “Динамические режимы работы электрических машин и электроприводов” – Каунас, 1988. – 87 с.

4. Захаров В. Ю. Математическое описание контура тока ВД со звеном постоянного тока / Захаров В. Ю. // Проблемы создания новых машин и технологий. Научные труды Кременчугского государственного политехнического института. – Вып. 4, 1997. - С. 102-106.

## ПОБУДОВА ДИСКРЕТНОЇ МОДЕЛІ СЕРЕДНІХ ЗНАЧЕНЬ КОНТУРУ СТРУМУ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ ЕЛЕКТРОВОЗА З ВЕНТИЛЬНИМ ДВИГУНОМ

*Захаров В.Ю., к.т.н., доц.*

*Національний транспортний університет*

*Сінчук І.О., к.т.н., Захаров В.В., студ.*

*Криворізький технічний університет*

*Буйвол Б.А., асп.*

*Кременчуцький державний університет імені Михайла Остроградського*

*вул. Першотравнева, 20, 39600, м. Кременчук, Україна*

*E-mail: [seem@kdu.edu.ua](mailto:seem@kdu.edu.ua)*

Отримані математичні залежності розрахунків **квазіустановлених** значень **струму** в ланці постійного **струму** тягового вентильного двигуна, які **використовують** мікропроцесори в контурах **керування** й регулювання. Показано, що використання мікропроцесорів і мікроелектронної обчислювальної машини для **керування** й регулювання електроприводом з вентильним двигуном з дискретної системи автоматичного **керування** є оптимальним способом регулювання по швидкодії, стійкості й точності, із застосуванням прямо **діючих датчиків** координат.

**Ключові слова:** вентильний двигун, контур струму, режим безперервного та перервного струму.

## CONSTRUCTION OF DISCRETE MODEL OF MEAN VALUES OF CONTOUR OF CURRENT OF ELECTROMECHANIC OF HAULING ELECTRICAL ENGINEERING COMPLEX OF ELECTRIC LOCOMOTIVE WITH VALVE ENGINE

*Zaharov V.U., Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

*National Transport University*

*Sinchuk I.O., Cand. Sc. (Tech.), Zaharov V.V., stud.*

*Kryvyi Rih Technical University*

*Byivol B.A., post-grad.*

*Kremenchuk Mykhaylo Ostrogradskiy State University*

*vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine*

*E-mail: [seem@kdu.edu.ua](mailto:seem@kdu.edu.ua)*

Mathematical dependences of calculation of the quasiestablished values of a current in a link of a direct current traction valve the engine which use microprocessors in steering and regulation circuits are received. It is shown that use of microprocessors and the microelectronic computer for steering and regulation by the electric drive with valve the engine from a discrete automatic control system is an optimum mode of regulation on speed, firmness and accuracy, with application directly and indirectly operating gauges of coordinates.

**Key words:** valve engine, contour of current, mode, continuous and to the pererвного current.

