

ТЯГОВЫЙ АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД С РЕГУЛИРОВАНИЕМ РАЗРЯДНОГО ТОКА АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ

В настоящее время в тяговом электроприводе (ТЭП) рассматривается применение асинхронного двигателя (АД) или вентильно-реактивного двигателя, что преследует цель повышения эксплуатационных характеристик. В то же время, наличие аккумуляторной батареи (АБ) ставит на первый план вопрос максимальной эффективности использования её энергии при повышении производительности транспортного средства. Это при том, что АБ представляет собой источник с изменяющимися в зависимости от степени разряда параметрами: E – ЭДС, $R_{\text{вн}}$ – внутреннее сопротивление [1]. Таким образом, вопрос совершенствования показателей следует рассматривать применительно системы ТЭП-АБ, что определяет актуальность данной работы.

Формирование закона регулирования АД рассмотрим на примере рудничного электровоза АМ-8Д. В качестве базовой рассматривается механическая характеристика двигателя постоянного тока (ДПТ). Характеристика ДРТ-13 при напряжении АБ $U_{\text{АБ}}=130\text{В}$ приведена на рис.1, кривая 2. На ней точка А соответствует часовому режиму ДПТ при механической мощности $P_2=P_q=13\text{кВт}$.

При замене ДПТ на АД его мощность в продолжительном режиме работы S_1 должна быть не меньше P_q , что соответствует рабочему участку механической характеристики АД (кривая 6, рис.1) при $P_{\text{ном}}=15\text{кВт}$ и числе пар полюсов $p=4$. В [2] для улучшения тяговых характеристик ТЭП с АД предложено использовать регулятор мощности. Он формирует задание на скорость вращения с помощью функционального преобразователя, работающего в функции заданного значения мощности и текущего значения момента двигателя. Принцип постоянства мощности широко применяется в ЭП при регулировании скорости АД $n_{\text{АД}}$ выше основной (характеристика 5 при $P_2=13\text{кВт}$). Это позволяет улучшить тяговые характеристики привода во второй зоне регулирования $n_{\text{АД}}$ за счет приближения (по сравнению с ДПТ) к границе тягового усилия по условию обеспечения сцепления (характеристика 8). При этом увеличивается производительность транспортного средства (зона У, на рис.1). Ограничивается скорость привода характеристикой (3), соответствующей увеличению $n_{\text{АД}}$ в 1.5 раза по отношению к основной. При регулировании $P_2=\text{const}$ системы ТЭП-АБ не учитывается снижение $U_{\text{АБ}}$. Так при уменьшении E и увеличении $R_{\text{вн}}$ увеличивается ток АБ I_L , что в соответствии с [1] снижает КПД АБ и ведет к ускоренному ее разряду. Влияние E , $R_{\text{вн}}$ на характеристики ТЭП может быть учтено стабилизацией напряжения в звене постоянного тока U_d [3]. В то же время при регулировании $n_{\text{АД}}$ выше основной скорости и ограничении активного тока АД на уровне 140-150% от номинального (характеристика 7, рис. 1), P_2 может быть увеличена на 60% от значения P_q (т.с). В этом случае I_L также увеличивается, что приводит к дополнительному снижению КПД системы ТЭП-АБ.

При $I_L=\text{const}$ (рис. 2) есть возможность регулирования P_2 ТЭП: $E I_L = \Delta P + P_2$ (где ΔP – суммарные потери мощности системы ТЭП – АБ). Тогда, при уменьшении $U_{\text{АБ}}$ тяговый привод с АД переходит из т.А→т.В с характеристики 5 на характеристику 4 (рис.1, $P_2=11\text{ кВт}$) подобно приводу с ДПТ (с кривой 2 на кривую 1 при $U_{\text{АБ}}=110\text{В}$). Как показали исследования в этом случае можно увеличить КПД АБ на 5% в сравнении $P_2=\text{const}$. Если же I_L изменять в соответствии с постоянством потерь в АБ $\Delta P_{\text{АБ}}=\text{const}$ ее КПД еще может быть увеличен на 3%. Регулированием I_L можно обеспечить работу АБ с КПД равным по величине КПД полностью заряженной батареи. В этом случае КПД АБ увеличивается на 10% в сравнении с законом регулирования $P_2=\text{const}$.

Цель работы: улучшение энергетических показателей системы ТЭП с АД за счет регулирования тока АБ.

Задача исследований: выполнить синтез системы регулирования тока АБ на основе модели ТЭП с АД.

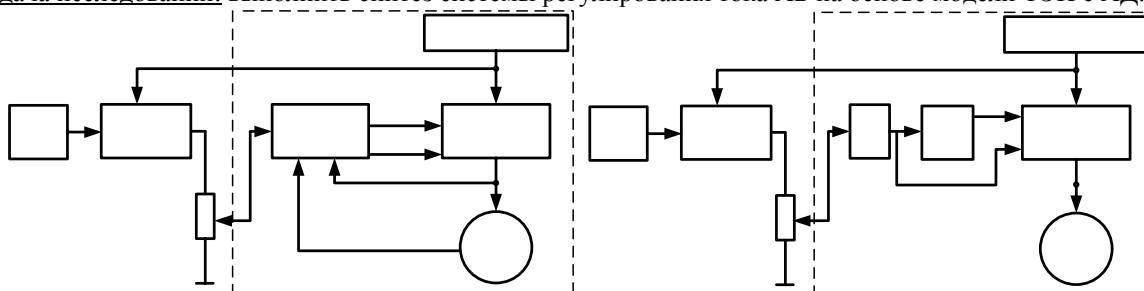


Рис.2 Функциональные схемы электропривода с регулированием электрической мощности:
а) векторное управление скоростью; б) скалярное управление скоростью

Результаты работы. Рассматривались два базовых принципа: векторное (рис.2,а) и скалярное управление (рис.2,б). При этом регулятор электрической мощности (РЭМ) является внешним и формирует желаемое задание скорости (ω, ω_1^*), в пределах которого формируется сигнал при ручном управлении («ПЕДАЛЬ»). Блок задания мощности (БЗМ) формирует задание I_L в соответствии с законом регулирования ($I_L=\text{const}, \Delta P_{AB}=\text{const}, \text{КПД}=\text{const}$).

При синтезе (РЭМ) учитывались следующие требования: 1) при регулировании I_L РЭМ должен обеспечивать астатизм по возмущающему воздействию (момент сопротивления - $M_c, E, R_{\text{вн}}, \Delta P$; 2) поскольку момент инерции тягового электропривода $J_{\text{мех}}$ определяется нагрузкой, РЭМ должен обеспечивать робастность к изменению $J_{\text{мех}}$, тем самым автоматизировав функцию настроек ТЭП; 3) для обеспечения тяговых характеристик ТЭП с АД, РЭМ должен обеспечивать работу во второй зоне регулирования $n_{\text{АД}}$.

Исходя из структуры объекта регулирования электрической мощности (ОРЭМ) получена передаточная функция РЭМ, которая имеет вид:

$$W_{\text{РЭМ}}(s) = \frac{U_{d \text{ min}}}{\omega_{\text{max}}} \frac{b_2 s^2 + b_1 s + 1}{a_2 s^2 + a_1 s}, \quad (1)$$

где $U_{d \text{ min}}$ – минимальное напряжение источника; ω_{max} – максимальная частота АД.

Как показали исследования, при изменении $J_{\text{мех}}$ наилучшее качество переходной функции мощности (рис.3) получилось при $b_2=a_2=0$. При регулировании ОРЭМ с векторным управлением (рис.2,а): $b_1=0, a_1=J_{\text{мех(max)}}/K_{yT\omega}$ (где $J_{\text{мех(max)}}$ – максимальный момент инерции, $K_{yT\omega} < (\omega^* J_{\text{мех(max)}})/(T_\omega M_{\text{огр}})$ – коэффициент увеличения инерционности контура регулирования скорости, T_ω – инерционность контура регулирования скорости, $M_{\text{огр}}$ – ограничение момента АД в первой зоне регулирования скорости). При этом робастность к изменению $J_{\text{мех}}$ достигается при $(K_{yT\omega} K_j) > 4$ (где $K_j = J_{\text{мех(min)}}/J_{\text{мех(max)}}$, $J_{\text{мех(min)}}$ – минимальный момент инерции механизма).

При регулировании ОРЭМ со скалярным управлением (рис.2,б) в первой зоне регулирования $n_{\text{АД}}$ наилучшую переходную функцию показал РЭМ с коэффициентами $a_1=2T_\mu\beta$ (где T_μ – некомпенсируемая постоянная времени инвертора, β – жесткость механической характеристики), $b_1=T_\omega$ – электромеханическая постоянная времени АД. При этом, чем больше $J_{\text{мех}}$ тем меньшее влияние он оказывает на переходную функцию. При переходе во вторую зону регулирования $n_{\text{АД}}$, β оказывает параметрическое возмущение на систему. Во второй зоне лучшее качество переходной функции было получено при $a_1=(8T_\mu\beta), b_1=8T_\mu$. При регулировании I_L в обеих зонах регулирования $n_{\text{АД}}$ наилучшие переходные процессы были получены при $a_1=(T_\omega\beta), b_1=T_\omega$. Если же $J_{\text{мех}}$ не изменяется, РЭМ может быть синтезирован в соответствии с (1).

Экспериментальные исследования были проведены на установке с двигателем мощностью 3кВт (РЭМ $b_2=a_2=0$). В качестве нагрузки использовалась машина постоянного тока. На рис.4 приведены осциллограммы I_L , скорости n , момента m : интервал $[0; \tau_1]$ соответствует пуску привода; интервал $(\tau_1; \tau_2)$ характеризует работу привода в режиме ограничения скорости $I_L < I_L^*$ (характеристика 3, рис.1); интервалы $[\tau_2; \tau_3]$ и $[\tau_3; \infty)$ соответствуют набросу и сбросу нагрузки; интервалы $[\tau_3; \tau_4)$ и $[\tau_4; \tau_5)$ соответствуют уменьшению и увеличению задания мощности. Полученные результаты подтверждают корректность изложенных положений синтеза РЭМ.

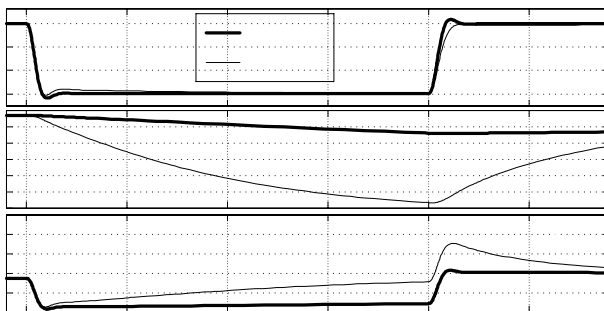


Рис.3 – Переходные функции изменения i_L^* в относительных единицах: $K_j=0.1; K_{yT\omega}=100; t_\omega=4; m_{c(\text{ном})}=0.75; m_{\text{огр}}=1.1; n_{\text{АД(ном)}}=1; i_{L(\text{ном})}=1$

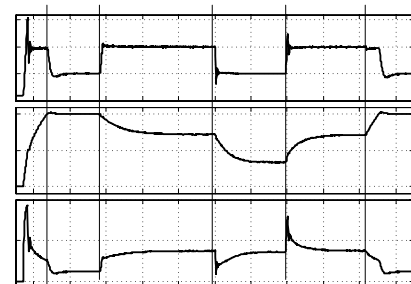


Рис.4 – Результаты экспериментального исследования регулирования мощности

Выводы: полученные принципы синтеза системы регулирования тока АБ в ТЭП с АД позволяют улучшить энергетические показатели транспортной установки. Кроме того, результаты могут быть обобщены для всех электрических машин и всех электроприводов, требующих по технологии регулирование мощности или работающих от источника ограниченной мощности.

ЛИТЕРАТУРА

- ГОСТ 26500-85. Аккумуляторы щелочные никель-железные тяговые. Общие технические условия. 1985г.
- Зачек О.І. Електромеханічні процеси та характеристики тягового частотно-керованого асинхронного електроприводу тролейбуса.: автореф. дис. на здобуття наукового ступеня кандидата техн. наук: спец. 05.09.03 «Електротехнічні комплекси та системи»/ О.І. Зачек. – Львів, 2000. – 19с.
- Matsumoto S. (TOYOTA MOTOR CORPORATION), *Advancement of hybrid vehicle technology.* / S. Matsumoto. 11th European Conference on Power Electronics and Application *EPE, Dresden, 2005.*