

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО АСИНХРОННОГО ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ДИЗЕЛЬ-ПОЕЗДА С УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ

**Введение.** Перевозка пассажиров на более 50% железных дорог Украины в настоящее время выполняется тепловозами и дизель-поездами (ДП). Создание мощных полностью управляемых силовых полупроводниковых приборов позволило применить в ДП асинхронный тяговый электропривод, обладающий лучшими технико-экономическими показателями по сравнению с приводом постоянного тока. В частности, достигнуть повышения мощности в 1,5-2 раза и момента асинхронного тягового двигателя (АТД) при одновременном снижении массы на 30-40% и габаритных размеров за счёт отсутствия коллектора, обмотки дополнительных полюсов и компенсационной обмотки и более низких затрат на обслуживание в условиях эксплуатации. Однако, широкое внедрение асинхронного привода на железных дорогах Украины сдерживается трудностями создания надёжной и экономичной системы управления (СУ) двигателем и общей СУ тяговым оборудованием ДП.

Эффективность работы тягового привода ДП в значительной мере определяется схемными решениями, оптимальной настройкой параметров системы и зачастую опытом машиниста. Опытные машинисты экономят до 5-10% топлива по сравнению с установленной нормой, руководствуясь не только указаниями "режимных карт", но и собственным опытом (позволяющим учитывать состояние погоды, тип и нагрузку вагонов, профиль пути, скорость движения и другие факторы) [1], что свидетельствует о имеющихся резервах экономии топлива и о перспективности разработки систем оптимального управления тяговым оборудованием ДП.

Совершенствование управления тяговым приводом включает в себя оптимальное согласование режимов работы дизеля, генератора, асинхронных двигателей с учётом распределённой тяги, упругостей и изменяющегося коэффициента сцепления колеса с рельсом.

**Постановка задачи исследования.** На структуру и алгоритмы существующей СУ тяговым приводом ДП с АТД оказала влияние используемая ранее СУ двигателями постоянного тока, в которой скорость двигателей регулировалась возбуждением СГ. В научных публикациях рассмотрено лишь скалярное управление ДП с тяговыми АД [1, 2, 3]. Представляющее большой практический интерес управление с учётом минимизации потребления топлива дизелем рассмотрено недостаточно полно. В частности, в [4] показаны возможности снижения расхода топлива до 10% тепловоза 2ТЭ116 за счёт повышения тепловозной характеристики дизеля. Математические модели и результаты моделирования тягового привода ДП с векторной СУ АТД в отечественной и зарубежной научной литературе не приведены.

Целью статьи является разработка математической модели тягового привода ДП для исследования усовершенствованного управления в системе "дизель – генератор – частотно-регулируемый АТД".

### Материалы исследования.

В существующей СУ ДП ДЕЛ-02 для управления движением поезда машинист задает частоту вращения дизеля (уровень мощности) при помощи контроллера машиниста. Заданный уровень мощности, отработанный дизелем, сравнивается с используемой мощностью тяговым приводом и оборудованием собственных нужд и по запасу свободной мощности изменяется ток в обмотке возбуждения СГ и, следовательно, выходное напряжение на статорных обмотках СГ. Характер движения ДП определяется свободной мощностью дизельной установки [1,2]. СУ АТД выполнена двухконтурной. Внешний контур регулирует возбуждение тягового СГ и задает величину напряжения, подводимого ко входу инверторов напряжения. Внутренний контур осуществляет регулирование частоты напряжения АТД. Управление тяговыми инверторами выполняется по скалярному принципу изменением частоты и амплитуды напряжения, которое подаётся на АТД.

Недостатки СУ электропередачей ДП ДЕЛ-02: управление скоростью поезда осуществляется машинистом косвенно при помощи задания мощности дизеля, что из-за ручного управления приводит либо к недоиспользованию мощности дизеля, либо к дополнительному расходу топлива; не используются преимущества векторного управления АТД.

**1. Усовершенствованная система управления тяговым приводом ДП.** Топливная экономичность дизеля определяется отлаженностью его работы на эксплуатационных режимах. Максимум коэффициента полезного действия дизеля достигается при совпадении тепловозной характеристики дизеля (зависимость эффективной мощности дизеля  $N_{\text{эф}}$  от частоты вращения  $n_d$ ,  $N_{\text{эф}}=f(n_d)$ ) с его экономичной характеристикой  $N_{\text{ек}}=f(n_d)$ , что позволяет вырабатывать необходимую мощность дизеля при меньших частотах вращения коленчатого вала [4]. Для обеспечения устойчивости работы в широком диапазоне регулирования скорости, в том числе при двухзонном регулировании на высоких скоростях, и широком изменении моментов сопротивления предлагается использовать систему векторного управления АТД. Структурная схема усовершенствованной системы управления тягового привода ДП приведена на рис.1. Принцип работы данной системы следующий: сначала машинист

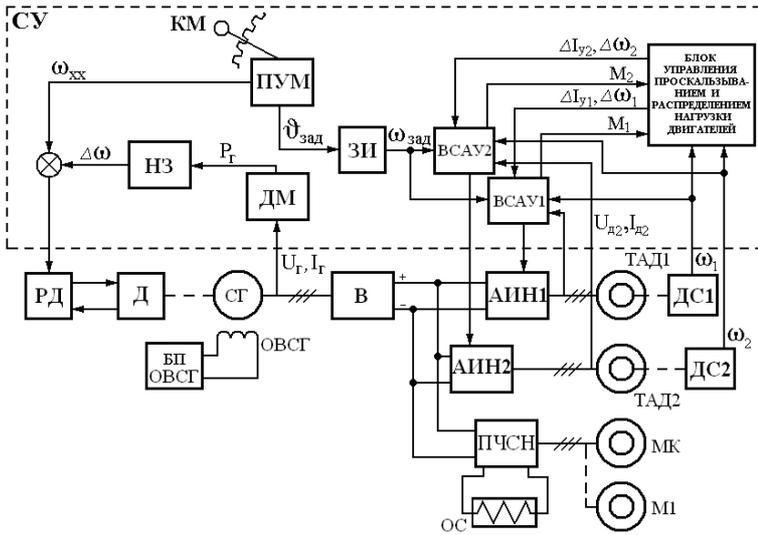


Рис. 1. Структурная схема усовершенствованной СУ ДП

Таблица 1 – Характеристика нелинейного звена  $\Delta\omega = f_{НЗ}(P_G)$

$P_G$ , кВт	25	37,5	55	75	115	150	210	260	325	375	425	470	505
$\Delta\omega$ , об/мин	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200

при трогании поезда с места или движении на гору) увеличивается потребляемый ток, возрастает уровень сигнала  $P_G$ , который через нелинейное звено преобразуется в сигнал  $\Delta\omega$ , что приводит к увеличению скорости дизеля и его мощности. При уменьшении тока СГ снижается сигнал мощности  $P_G$ , уменьшается сигнал корректировки задания скорости вращения дизеля  $\Delta\omega$ , и дизель уменьшает скорость, соответственно и мощность, до необходимой. В такой системе обратная связь по мощности генератора определяет необходимую текущую мощность дизеля, что не требует ручного поддержания скорости ДП машинистом и исключает работу дизеля в недогруженном режиме.

**2. Математическая модель усовершенствованной СУ АТД.** При моделировании используются следующие допущения: все вагоны ДП представлены в виде одной сосредоточенной массы, упругости в поезде и пути не рассматриваются, связь колес с рельсами рассматривается без проскальзывания, характеристики АТД и векторных СУ приняты одинаковыми. Управляющим воздействием на дизель является положение  $h_p$  – рейки топливных насосов дизеля, возмущающим воздействием является момент сопротивления  $M_{CD}$ , выходной сигнал – скорость вала дизеля  $\omega_D$ . Управляющими сигналами генератора является скорость вращения ротора  $\omega_D$  и ток обмотки возбуждения  $i_f$ , возмущающее воздействие – статорный ток генератора  $I_G$ , выходной сигнал – напряжение на зажимах генератора  $U_G$ . Если передаточные функции дизеля и генератора по возмущению и управлению представить в виде инерционных звеньев [3], то общую математическую модель тягового привода можно представить в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned}
 \omega_D &= h_p \frac{k_\mu}{T_\mu p + 1} - M_{CD} \frac{k_\lambda}{T_\lambda p + 1}, \\
 M_{CD} &= P_G / \omega_D, \\
 \omega_{зд} &= \omega_{ххД} + \Delta\omega_D, \\
 \Delta\omega_D &= \frac{f_{НЗ}(P_G)}{T_{НЗ} p + 1}, \\
 P_G &= U_G \cdot I_G, \\
 U_G &= \frac{\omega_D \cdot \Phi(i_f)}{T_B p + 1} - I_G R, \\
 I_G &= 2I_{ДВ} + U_G / R_{отопл}, \\
 I_{ДВ} &= \sqrt{I_{SX}^2 + I_{SY}^2}, \\
 \text{где } M_C &= M_{C0} + k_2 \omega, \\
 T_\mu I_{IX}^* &= (\Psi_r^* - \Psi_r) \cdot W_{PI}(p), \\
 \text{и } T_\mu I_{IY}^* &= (\omega^* - \omega) \cdot W_{PC}(p), \\
 T_\lambda I_{SX} &= (I_{IX}^* - I_{IX}) \cdot W_{PT1}(p) \cdot W_{ПЧ}(p) \cdot W_T(p), \\
 T_\lambda I_{SY} &= (I_{IY}^* - I_{IY}) \cdot W_{PT2}(p) \cdot W_{ПЧ}(p) \cdot W_T(p)
 \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

янные времени дизеля по возмущающему и управляющему воздействию соответственно;  $k_\mu$  и  $k_\lambda$  – коэффициенты передачи дизеля по управлению и возмущению соответственно;  $\omega_{зд}$  – задание скорости дизеля;  $T_{НЗ}$  – постоянная времени обратной связи с нелинейным звеном;  $\Phi(i_f)$  – магнитный поток СГ;  $R$  – активное сопротивление обмотки статора СГ;  $T_B$  – постоянная време-

запускает дизель до скорости холостых оборотов, и на выходе СГ возникает соответствующий уровень напряжения. Сигнал задания скорости поезда  $v^*$  от контроллера машиниста КМ поступает на векторные СУ ВСАУ1, ВСАУ2 каждого АТД. Датчик мощности ДМ по току и напряжению на выходе СГ определяет уровень мощности, потребляемой всем электрооборудованием. Данный уровень мощности в виде сигнала  $P_G$  через нелинейное звено НЗ формирует сигнал корректировки задания скорости дизеля в соответствии с экономической характеристикой дизеля. Характеристика нелинейного звена приведена в таблице 1.

При возрастании нагрузки генератора (например, при включении отопления,

ни обмотки возбуждения генератора;  $I_{дв}$  – статорный ток АД;  $M_{C0}$  – момент сопротивления ДП при нулевой скорости;  $k_2$  – коэффициент сопротивления ДП от скорости;  $I_{IX}^*$ ,  $I_{IY}^*$  – сигналы заданий первой гармоники намагничивающей и активной составляющих статорного тока соответственно;  $\Psi_r^*$ ,  $\omega^*$  – задание потокосцепления и скорости АД соответственно;  $\Psi_r$ ,  $\omega$  – текущее значение потокосцепления ротора и скорости АД соответственно;  $W_{ПЧ}(p)$  и  $W_T(p)$  – передаточные функции преобразователя частоты и токового звена:

$$W_{ПЧ}(p) = U_r / (T_{ПЧ}p + 1), \quad W_T(p) = 1 / R_S(T_\sigma p + 1). \quad (2)$$

Для немецкого дизеля 12V183DE и СГ ГС 530У2, установленных на ДП, исходя из их характеристик [1, 2], численные значения параметров следующие:  $T_\mu = 3с$ ;  $T_\lambda = 3с$ ;  $k_\mu = 197,6$ ;  $k_\lambda = 1 \text{ Н}^{-1} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ ;  $T_{НЗ} = 0,01с$ ;  $R = 0,216 \text{ Ом}$ ;

$T_B = 0,5с$ ;  $M_{C0} = 473,2 \text{ Н} \cdot \text{м}$ ;  $k_2 = 10 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}$ .

Для обеспечения высоких динамических свойств привода используется векторная СУ АД. АД при частотно-токовом управлении описывается следующей системой уравнений [6]:

$$\left. \begin{aligned} L_m I_{sx} &= \Psi_r + T \frac{d\Psi_r}{dt}, \\ L_m I_{sy} &= (\omega_{\Psi r} - z\omega) T \Psi_r, \\ M &= \frac{3}{2} z k \Psi_r I_{sy} \\ M - M_C &= J \frac{d\omega}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где  $\Psi_r$  – модуль обобщенного вектора потокосцепления ротора АД;  $L_m$  – взаимная индуктивность;  $\omega$  – скорость ротора;  $M_C$  – момент сопротивления;  $z$  – количество полюсов;  $J$  – приведенный к валу АД момент инерции привода;  $T$  – электромагнитная постоянная времени ротора,  $I_{sx}$ ,  $I_{sy}$  – намагничивающая и моментная составляющие статорного тока;  $\omega_{\Psi r}$  – скорость обобщенного вектора потокосцепления ротора;  $k$  – конструктивная постоянная АД;  $M$  – электромагнитный момент на валу АД.

Построение векторной СУ выполняется согласно [6]. Выполнен расчёт на модульный оптимум передаточных функций регуляторов намагничивающей  $W_{PT1}(p)$  и активной  $W_{PT2}(p)$  составляющих статорного тока, регулятора потокосцепления  $W_{PI}(p)$  и регулятора скорости  $W_{PC}(p)$ . Для АД АД906У1, установленных на ДП ДЕЛ-02, имеющих параметры: номинальная мощность 240 кВт, номинальное фазное напряжение 665 В, номинальный фазный ток 155 А, номинальный момент 2366 Н·м, число полюсов – 6, номинальная частота питающей сети 33,8 Гц, КПД – 93 %; и параметров поезда: масса моторного вагона  $m_M = 64 \text{ т}$ , масса пассажирского вагона  $m_p = 46 \text{ т}$ , радиус колеса  $r = 0,475 \text{ м}$ , передаточное число редуктора  $i = 2,37$  значения передаточных функций регуляторов следующие:

$$W_{PT}(p) = \frac{0,0356p + 1}{9,065p}, \quad W_{PI}(p) = \frac{1,231p + 1}{0,0019p}, \quad W_{PC}(p) = 12482. \quad (4)$$

**3. Результаты моделирования.** Проверка принципа работы усовершенствованной СУ выполнялась на упрощенной модели тягового привода ДП. На рисунках 2 и 3 показаны результаты моделирования следующей последовательности работы оборудования: разгон дизеля до холостых оборотов (700 об/мин), в момент времени  $t=10с$  включается канал потокосцепления и в АД создается магнитный поток. В момент времени  $t=25с$  включается канал регулирования скорости и начинается разгон ДП, при этом дизель работает на максимальных оборотах (1900 об/мин). По окончании разгона (скорость АД  $\omega_{дв} = 70 \text{ рад/с}$ ) обороты дизеля уменьшаются до 1500 об/мин. В момент времени  $t=100с$  поступает сигнал задания на снижение скорости ДП до 60 рад/с, выполняется электрическое торможение ДП до новой скорости, дизель во время торможения разгружается, а затем выходит на новое значение скорости – 1470 об/мин. В момент времени  $t=150с$  ДП начинает движение на гору, чему соответствует увеличение статического момента сопротивления  $M_C$ , обороты дизеля при этом возрастают до 1700 об/мин. В момент времени  $t=200с$  поезд разгоняется до скорости 70 рад/с, при этом во время разгона дизель работает на максимальных оборотах. В момент времени  $t=250с$  включается отопление салона, что также приводит к увеличению оборотов дизеля. В момент времени  $t=270с$  поступает сигнал задания на остановку ДП, происходит электрическое торможение, при этом обороты дизеля уменьшаются до холостых, так как энергия на отопление салона поступает от тяговых инверторов, которые работают в данном режиме выпрямителями. По окончании торможения отключается канал регулирования потокосцепления АД, дизель работает только на отопи-

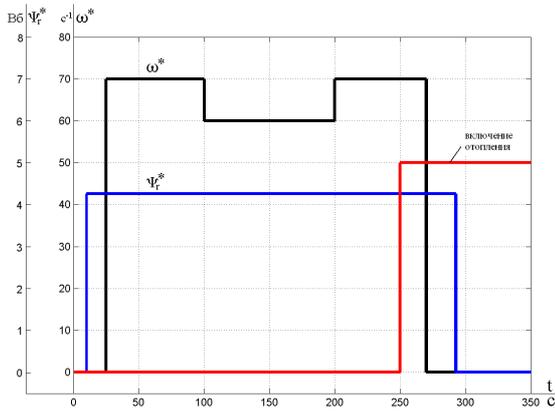


Рис. 2. График изменения задания скорости и потокосцепления АТД

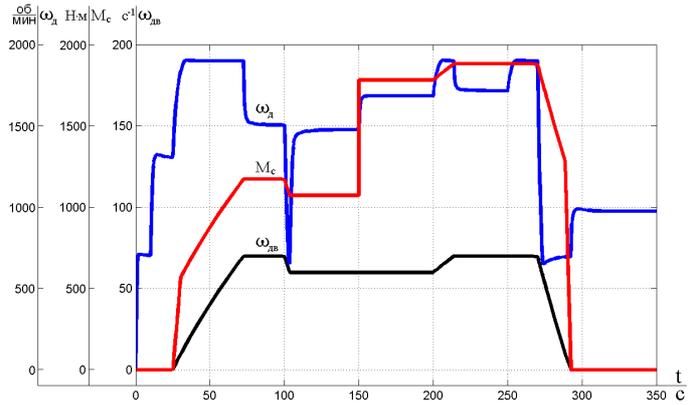


Рис. 3. Результаты моделирования упрощенной модели тягового привода ДП с усовершенствованной СУ

тельную нагрузку со скоростью 950об/мин. В рассмотренной модели сигналы задания уровня потокосцепления и скорости АТД подаются в моменты времени  $t=10$ с и  $t=25$ с соответственно.

Переключение режимов можно выполнить автоматически при достижении соответствующих значений оборотов дизеля и потокосцепления. Результаты моделирования тягового привода с автоматическим переключением режимов с полной моделью силовых приборов выпрямителя и инвертора, АД и векторной системой управления приведены на рис. 4. Частота переключения силовых приборов принималась равной 1000Гц.

**Выводы.** 1. Разработанная математическая модель тягового привода ДП позволяет исследовать процессы во взаимосвязанной системе "дизель – генератор – асинхронный двигатель с векторной СУ". 2. Результаты моделирования подтверждают работоспособность усовершенствованной СУ асинхронным тяговым приводом ДП.

#### Литература.

1. Носков В.И., Дмитриенко В.Д., Заповольский Н.И., Леонов С.Ю. Моделирование и оптимизация систем управления и контроля локомотивов. Научное издание – Харьков: ХФИ "Транспорт Украины", 2003. – 248с.

2. Басов Г.Г. Прогнозування розвитку дизель-поїздів для залізниць України: Монографія. Ч.1–Харків: "Апекс+", 2004. – 240с.

3. Луков Н.М., Автоматизация тепловозов, газотурбовозов и дизельпоездов. – М.: Машиностроение, 1988. – 272 с.:ил.

4. Бычков Д.А. Снижение эксплуатационного расхода топлива тепловозами 2ТЭ116 путем применения микропроцессорной системы управления дизельгенератором ([Электронный ресурс]). Дис. канд. техн. наук: 05.22.07., М.: РГБ, 2006. – 181 с.

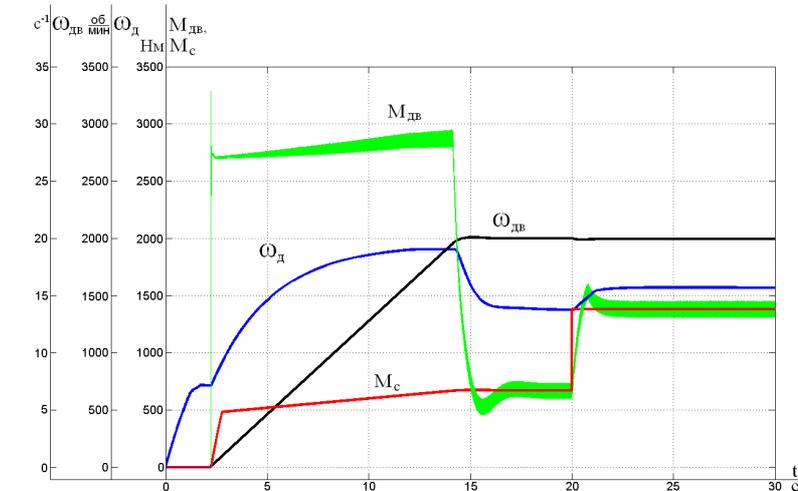


Рис. 4. Результаты моделирования полной модели тягового привода ДП с усовершенствованной СУ

5. Андриенко П.Д., Лобода В.Д., Мищенко А.В. Преобразователи частоты для электропередачи железнодорожного электротранспорта / Электротехника та електроенергетика, №1, -2001. - С. 55-58.

6. Пивняк Г.Г. Волков А.В. Современные частотно-регулируемые асинхронные электроприводы с широтно-импульсной модуляцией: Монография. – Днепропетровск: Национальный горный университет, 2006. – 470с.