

## УЧЁТ УПРУГИХ СВЯЗЕЙ И РАСПРЕДЕЛЁННОЙ НАГРУЗКИ ПРИ ВЕКТОРНОМ УПРАВЛЕНИИ АСИНХРОННЫМ ТЯГОВЫМ ПРИВОДОМ ДИЗЕЛЬ-ПОЕЗДА

Створена модель з урахуванням пружних зв'язків між вагонами розподільного асинхронного привода з векторними системами керування дизель-поїзда ДЕЛ-02. Розроблена система керування розподільного привода дизель-поїзда із блоками загальних зворотних зв'язків. Виконано математичне моделювання розробленої системи.

Составлена модель с учётом упругостей между вагонами распределённого асинхронного привода с векторными системами управления дизель-поезда ДЭЛ-02. Разработана система управления распределённого привода дизель-поезда с блоками общих обратных связей. Выполнено математическое моделирование разработанной системы.

The model with the account elasticities between carriages of the distributed asynchronous drive with vector control systems of a diesel engine - train ДЭЛ-02 is made. The control system of the distributed drive of the diesel engine - train with blocks of the general feedback is developed. Mathematical modeling the developed system is executed.

### Введение

На сегодняшний день более 50 % железных дорог Украины не электрифицированы. Перевозка пассажиров здесь выполняется тепловозами и дизель-поездами (ДП). Создание мощных полностью управляемых силовых полупроводниковых приборов позволило упростить схемотехнические решения силовых цепей преобразователя и применить в ДП асинхронный тяговый электропривод переменного тока. При одинаковой мощности тяговых агрегатов асинхронный тяговый привод обладает лучшими технико-экономическими показателями по сравнению с приводом постоянного тока. Однако, широкое внедрение асинхронного привода на железных дорогах Украины сдерживается трудностями создания надёжной и экономичной системы управления.

На стадии проектирования исследование динамических процессов движения ДП целесообразно на основе компьютерного моделирования. При этом необходимо создание единой электромеханической системы, включающей силовую электрическую схему, систему управления тяговым приводом и механическую часть привода [1].

Распределённый тяговый привод по сравнению локомотивной тягой имеет ряд преимуществ: расширение возможностей электрического торможения поезда, увеличение результирующих тяговых усилий, более равномерное распределение усилий при разгоне поезда. Однако для качественного управления поездом усложняется его система управления. Это вы-

звано работой тяговых двигателей на общий вал с учётом сцепления колёс с рельсами и наличием упругостей в устройстве вагонов.

Для обеспечения равномерной нагрузки двигателей, работающих на общий вал их механические характеристики должны быть мягкими или в случае жестких характеристик идентичными. С другой стороны уменьшение избыточного проскальзывания колёс достигается при жёстких механических характеристиках двигателей. Естественные механические характеристики асинхронных двигателей (АД) являются жёсткими, а в электроприводах с регуляторами скорости жёсткость характеристик становится ещё выше, вплоть до абсолютно жёсткой. Наличие упругостей между вагонами приводит к возникновению продольных колебаний между вагонами и, следовательно, к колебаниям нагрузок на тяговые двигатели. В [2] отмечается, что важнейшим требованием к существующим и вновь создаваемым конструкциям локомотивов является повышение надёжности тягового привода путём снижения вибрационной и динамической загруженности их узлов. Использование векторной системы управления АД позволяет улучшить динамические свойства привода.

В публикациях, рассматривающих вопросы управления ДП, индивидуальное управление тяговыми АД с учётом скоростей и моментов других двигателей рассмотрены недостаточно полно [3, 4, 5]. Учёт упругостей между вагонами поезда при расчёте систем управления, а также расчёт и моделирование тягового привода с векторной системой

управления АД в отечественной и зарубежной научной литературе не освещён.

Целью статьи является разработка системы векторного управления распределённым асинхронным тяговым приводом ДП ДЭЛ-02, учитывающей упругости между вагонами.

### 1. Математическая модель механической части распределённого привода ДП

ДП ДЭЛ-02 состоит из трёх вагонов: двух моторных и одного пассажирского. В каждом моторном вагоне установлено по два тяговых АД, каждый из которых через редуктор приводит во вращение одну колёсную пару (рис. 1). Питание двигателей осуществляется от установленного в каждом моторном вагоне синхронного генератора через неуправляемый выпрямитель и автономные инверторы напряжения. Генератор приводится во вращение дизелем.

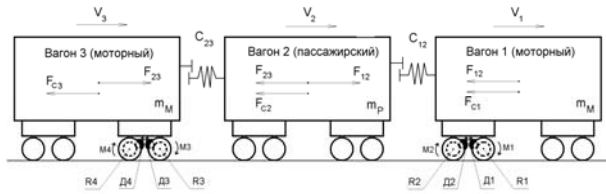


Рис. 1. Упрощенная схема дизель-поезда

При математическом описании механической части ДП приняты следующие упрощения: вагон (корпус с тележками и колёсами) представляется в виде одной сосредоточенной массы; упругость пути не рассматривается; связь между вагонами представляется упругим звеном без зазора и гасителей колебаний; проскальзывания между колёсами и рельсами отсутствуют.

Для получения математической модели механической части распределённого привода сделаем следующие обозначения:  $M_1, M_2, M_3, M_4$  – электромагнитные моменты, развиваемые двигателями Д1, Д2, Д3, Д4 (рис. 1);  $F_{C1}, F_{C2}, F_{C3}$  – силы сопротивления движению первого, второго и третьего вагонов соответственно;  $C_{12}, C_{23}$  – коэффициенты упругости между первым и вторым, и вторым и третьим вагонами;  $m_M$  – масса моторного вагона,  $m_P$  – масса пассажирского вагона;  $i$  – передаточное число редуктора;  $R_1, R_2, R_3, R_4$  – радиусы колёс первой, второй, третьей и четвёртой моторной пары соответственно;  $V_1, V_2, V_3$  – скорости первого, второго и третьего вагонов соответственно;  $F_{12}, F_{23}$  – силы, действующие между первым и вторым, вторым и третьим вагонами

поезда соответственно.

Система уравнений, описывающая движение вагонов поезда, имеет вид:

$$\begin{cases} M_1 i / R_1 + M_2 i / R_2 - F_{C1} - F_{12} = m_M dV_1 / dt, \\ M_3 i / R_3 + M_5 i / R_5 - F_{C3} + F_{23} = m_M dV_3 / dt, \\ F_{12} = C_{12} \int_0^T (V_1 - V_2) dt, \\ F_{23} = C_{23} \int_0^T (V_2 - V_3) dt, \\ F_{12} - F_{23} - F_{C2} = m_P dV_2 / dt. \end{cases} \quad (1)$$

### 2. Математическая модель векторной системы управления тяговым АД

Для обеспечения высоких динамических свойств привода используется векторная система автоматического управления (САУ) АД. Обобщённая функциональная схема векторной САУ приведена на рис. 2.

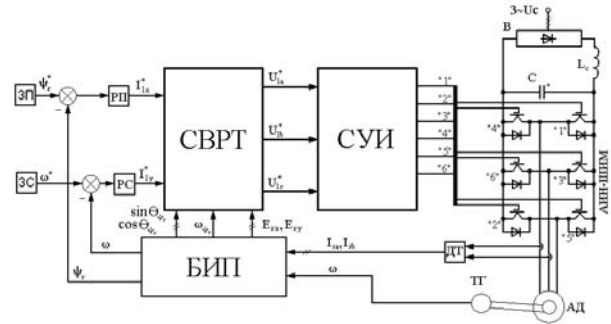


Рис. 2. Обобщенная функциональная схема векторной САУ скорости частотно-регулируемого ЭП ДП

Система состоит из выпрямителя В, автономного инвертора с широтно-импульсной модуляцией АИН ШИМ, системы управления инвертором СУИ, системы векторного регулирования тока СВРТ, блока идентификации параметров БИП, датчиков тока ДТ, датчика частоты вращения вала двигателя – ТГ, регуляторов потока РП и скорости РС. Асинхронный привод с векторной САУ описывается следующей системой уравнений [5]:

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

где  $\Psi_r$  – модуль обобщённого вектора потокоцепления ротора  $\bar{\Psi}_r$  АД;  $L_m$  – взаимная индуктивность;  $\omega$  – частота вращения 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;  $\omega_{\Psi_r}$  – частота вращения обобщенного вектора потокоцепления ротора;  $k$  – конструктивная постоянная АД;  $M$  – электромагнитный момент на валу АД.

Построение векторной САУ выполняется согласно [6]. При построении общей системы управления ДП для проверки принципов работы целесообразно асинхронный привод с векторной САУ представить в упрощённом виде (рис. 3). Векторная САУ содержит регуляторы активной и намагничивающей составляющих тока, регулятор потока и регулятор скорости.

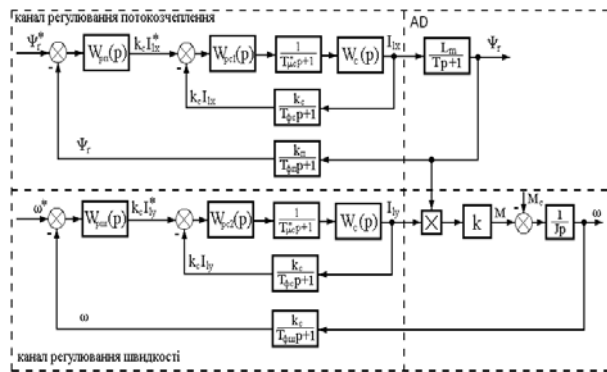


Рис. 3. Упрощенная структурная схема асинхронного привода с векторной системой управления

В векторной системе управления выполнен расчёт передаточных функций  $W_{PT1}(p)$  и  $W_{PT2}(p)$  регуляторов намагничивающей и активной составляющих статорного тока соответственно, регулятора потокоцепления –  $W_{PI}(p)$  и регулятора скорости –  $W_{PC}(p)$ . Для ТАД АД906У1, установленного на ДП ДЭЛ-02, имеющего 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  $m_M = 64$  т, масса пассажирского вагона  $m_P = 46$  т, радиус колеса  $R = 0,475$  м, передаточное число редуктора  $i = 2,47$  выполнен расчёт на модульный оптимум передаточных функций регуляторов:

$$\left. \begin{aligned} W_{PT}(p) &= \frac{0,0354p+1}{6,4p}, \\ W_{PI}(p) &= \frac{1,232p+1}{0,0012p}, \\ W_{PC}(p) &= 125. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Остальные блоки САУ рассчитаны по методике, приведённой в [6].

### 3. Разработка общей системы управления распределённого тягового привода

Во время эксплуатации ДП происходит износ бандажей колёсных пар, что приводит к изменению радиуса колеса. Допускается эксплуатация колёс с диаметром от 950 мм до 870 мм. Частота вращения АД измеряется на валу двигателя, при этом с помощью регуляторов скорости обеспечивается одинаковая частота вращения двигателей привода, что при разных радиусах колёс приводит к разным угловым скоростям колёсных пар, а, следовательно, к разным механическим характеристикам тяговых приводов. Из-за отличия жёстких механических характеристик отдельных тяговых приводов возникают значительные несовпадения (вплоть до разных знаков) развиваемых электромагнитных моментов АД. Это приводит к перегреву двигателей, дополнительному расходу энергии, возникновению продольных колебаний между вагонами, появлению режима буксования и другим нежелательным явлениям.

Задачей рассматриваемой в данной статье общей системы управления является обеспечение одинаковой загрузки двигателей и обеспечение отсутствия продольных колебаний между вагонами. Для выполнения поставленной задачи в общей системе управления реализованы две общие обратные связи по разности моментов двигателей и разности скоростей вагонов. Структура общей системы управления представлена на рис. 4. Блок *Mech. model* представляет упрощённую математическую модель механики движения поезда. Блоки *Cog. moment* и *Cog. speed* являются блоками общих обратных связей по разности моментов двигателей и разности скоростей вагонов соответственно.

Блоки EP1, EP2, EP3, EP4 – асинхронные тяговые электроприводы с векторными системами управления, соответственно, первой, второй, третьей и четвёртой обмоточной колёсной пары. Выходными сигналами этих блоков, соответственно, являются моменты  $M_1, M_2, M_3, M_4$  двигателей. Входными сигналами являются:

$\omega^*$  – сигнал задания частоты вращения АД;  $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$  – сигналы обратных связей по частоте вращения от первого, второго, третьего и четвёртого двигателей соответственно;  $d\omega_{V1}, d\omega_{V2}, d\omega_{V3}, d\omega_{V4}$  – сигналы коррекции задания частоты вращения АД соответственно для первого, второго, третьего и четвёртого двигателей от блока общей обратной связи скоростей вагонов Ког. скорости;  $d\omega_{M1}, d\omega_{M2}, d\omega_{M3}, d\omega_{M4}$  – сигналы коррекции задания частоты вращения АД, соответственно для первого, второго, третьего и четвёртого двигателей от блока Ког. моментов общей обратной связи по разности моментов двигателей.

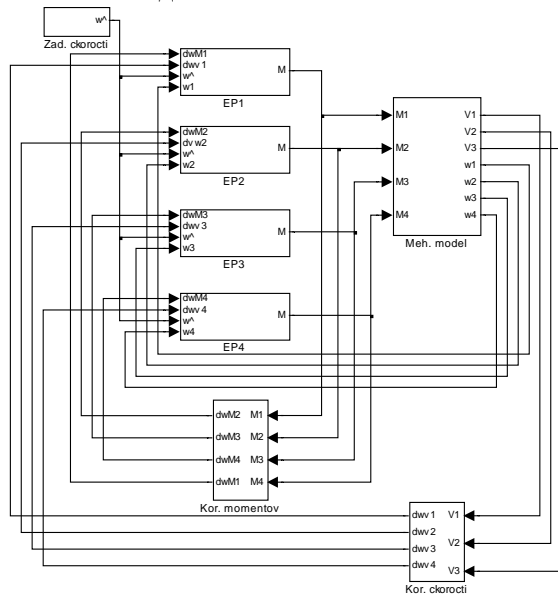


Рис. 4. Структура общей системы управления распределённым тяговым приводом

Результирующие сигналы задания частот вращения АД для первого, второго, третьего и четвёртого двигателей вычисляются по формулам:

$$\left. \begin{aligned} \omega_{Z1} &= \omega^* - d\omega_{V1} - d\omega_{M1}, \\ \omega_{Z2} &= \omega^* - d\omega_{V2} - d\omega_{M2}, \\ \omega_{Z3} &= \omega^* - d\omega_{V3} - d\omega_{M3}, \\ \omega_{Z4} &= \omega^* - d\omega_{V4} - d\omega_{M4}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Блок Ког. скорости по значениям скорости вагонов  $V_1, V_2, V_3$  вырабатывает сигналы коррекции задания частоты вращения  $d\omega_{V1}, d\omega_{V2}, d\omega_{V3}, d\omega_{V4}$  соответственно для первого, второго, третьего и четвёртого двигателей по следующим формулам:

$$\left. \begin{aligned} d\omega_{V1} &= d\omega_{V2} = (V_1 - V_2)k_{1V}, \\ d\omega_{V3} &= d\omega_{V4} = (V_3 - V_2)k_{2V}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Блок Ког. моментов по значениям моментов двигателей вырабатывает сигналы коррекции задания частоты вращения соответственно для первого, второго, третьего и четвёртого двигателей по следующим формулам:

$$\left. \begin{aligned} d\omega_{M1} &= (2M_1 - M_2 - M_4)(k_{PM} + k_{IM} / p), \\ d\omega_{M2} &= (2M_2 - M_1 - M_3)(k_{PM} + k_{IM} / p), \\ d\omega_{M3} &= (2M_3 - M_2 - M_4)(k_{PM} + k_{IM} / p), \\ d\omega_{M4} &= (2M_4 - M_1 - M_3)(k_{PM} + k_{IM} / p). \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Настройка параметров  $k_V, k_{PM}, k_{IM}$  блоков общих обратных связей выполнялась с использованием пакета расширения NCD (Nonlinear Control Design) системы Matlab, позволяющего выполнять динамическую оптимизацию параметров системы.

#### 4. Результаты моделирования

При выполнении моделирования движения ДП задавались следующие значения параметров: масса моторного вагона  $m_M = 64$  т, масса пассажирского вагона  $m_P = 46$  т, коэффициенты упругости между вагонами  $C_{12} = C_{23} = 938600$  Н/м, радиусы ведущих колёсных пар задавались не одинаковые –  $R_1 = 0,47$  м,  $R_2 = 0,445$  м,  $R_3 = 0,45$  м,  $R_4 = 0,465$  м. Выполнялся разгон поезда от нулевой скорости до 100 км/ч. Силы сопротивления первого и третьего вагонов  $F_{C1} = F_{C3} = 9500$  Н; сила сопротивления второго вагона  $F_{C2} = 6900$  Н.

На рисунке 5 показаны графики скорости поезда, изменения расстояний между вагонами и электромагнитные моменты двигателей без применения дополнительных блоков общей обратной связи. На рисунке обозначено:  $dS1, dS2$  – изменения расстояний между первым и вторым, вторым и третьим вагонами соответственно;  $V_p$  – скорость поезда, делённая на 2000 (км/ч);  $M_1, M_2, M_3, M_4$  – электромагнитные моменты тяговых двигателей. Из рис. 5,а видно, что из-за жёсткости механических характеристик асинхронных приводов при разных радиусах колёс, АД развивают электромагнитные моменты с разными знаками. При изменении нагрузки (например, движение в гору) в момент времени  $t = 100$  с возникают колебания между вагонами (рис. 5, б).

Подключение настроенных блоков общих обратных связей с параметрами  $k_V = 5,006$ ,  $k_{PM} = 0,00025$ ,  $k_{IM} = 0,0057$ , найденными NCD блоками, позволило практически обеспечить равен-

ство моментов двигателей и свести к минимуму продольные колебания между вагонами (рис. 6).

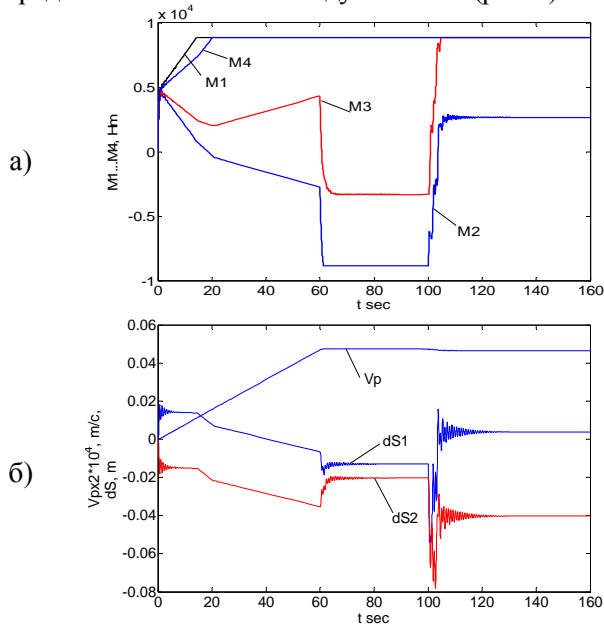


Рис. 5. Графики скорости поезда, изменений расстояний между вагонами и электромагнитных моментов двигателя без применения дополнительных блоков коррекции: а – моменты двигателей; б – изменения расстояний между вагонами и скорость поезда

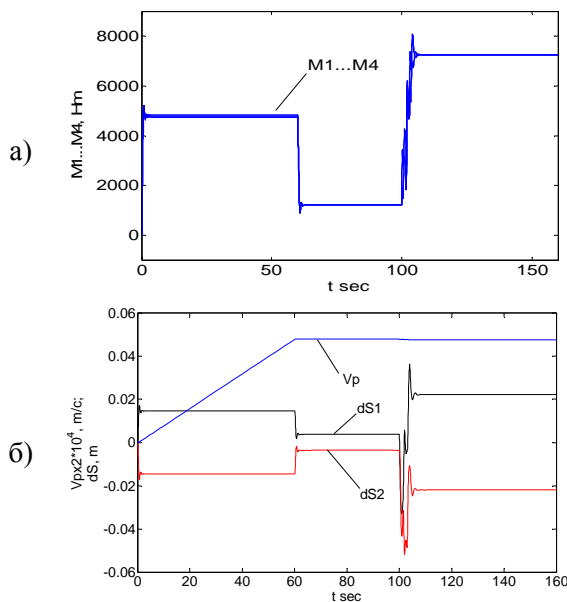


Рис. 6. Перемещения вагонов и моменты двигателей с блоками общих обратных связей: а – моменты двигателей; б – изменения расстояний между вагонами и скорость поезда.

Изменения выходных сигналов корректирующих блоков приведено на рис. 7.

**Выводы.** 1. Результаты исследования на модели движения ДП с распределённым тяговым асинхронным приводом с векторной САУ показали, что без введения в систему управления дополнительных общих обратных связей возникают продольные колебания между вагонами

и тяговые двигатели развивают разные электромагнитные моменты, вплоть до работы некоторых двигателей в генераторном режиме.

2. Введение в систему управления дополнительных блоков общей обратной связи по разности скоростей вагонов и разности моментов двигателей позволило обеспечить практически равенство моментов двигателей, а также снизить амплитуду колебаний между вагонами и в несколько раз длительность этих колебаний, что подтверждено результатами моделирования.

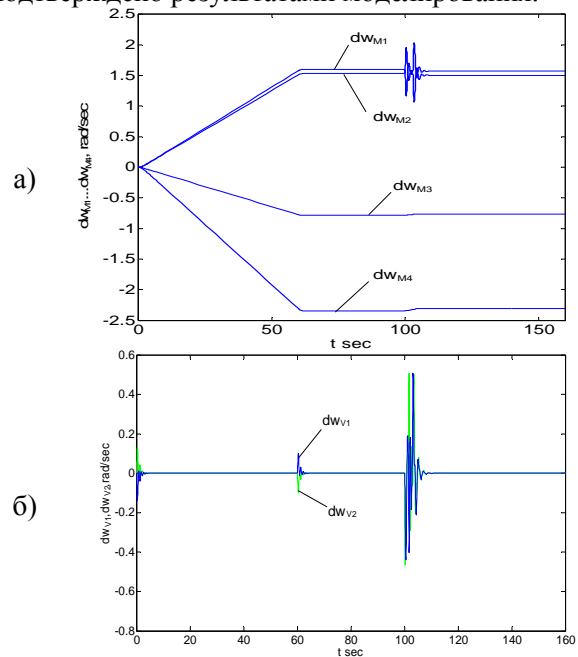


Рис. 7. Выходные сигналы корректирующих блоков

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.

1. Федяева Г. А., Федяев В. Н. Математическое моделирование электромеханических процессов в асинхронном тяговом приводе тепловоза ТЭМ21 -. Вестник ВНИИЖТ, 2005. № 6. С. 39-45.
2. Павленко А. П. Динамика тяговых приводов магистральных локомотивов.- М.: Машиностроение, 1991. – 192 с.
3. Носков В. И. Моделирование и оптимизация систем управления и контроля локомотивов. / В. И. Носков, В. Д. Дмитриенко, Н. И. Заповольский, С. Ю. Леонов. // Научн. изд. – Харьков: ХФИ, Транспорт Украины, 2003. – 248 с.
4. Басов Г. Г. Прогнозування розвитку дизель-поїздів для залізниць України: Монографія. Ч. 1–Харків: Апекс+, 2004. – 240 с.
5. Басов Г. Г. Розвиток електричного моторвагонного рухомого складу. / Г. Г. Басов, С. И. Яцько. Ч. 2 – Харків.: Апекс+, 2005. – 248 с.
6. Пивняк Г. Г. Современные частотно-регулируемые асинхронные электроприводы с широтно-импульсной модуляцией: Монография. / Г. Г. Пивняк, А. В. Волков. – Д.: НГУ, 2006. – 470 с.

Поступила в редакцию 25.10.2007.