

as well as high reliability and compactness of the converter. These factors confirm the choice of this power structure in the development of frequency-controlled drives of the AT series.

References

1. Kayumov, S. N. Kuch elektronikasi va metro vagonlari elektr qurilmalari / S. N. Kayumov. – Tashkent: Transport, 2023. – 143 c.
2. Berdiev, U. T. Elektr transportini avtomatlashtirish va boshqarish. Darslik / U. T. Berdiev, S. N. Kayumov, Ye. V. Iksar. – Tashkent: Transport, 2023. – 343 c.
3. Berdiev, U. T. Electrical and electronic EPS equipment / U. T. Berdiev, B. N. Khushbakov, S. N. Kayumov. – Tashkent: Sams ASA, 2014. – 212 p.
4. Петрушин, А. Д. Оптимальное частотное управление асинхронными тяговыми двигателями электропоездов / А. Д. Петрушин, Т. С. Титова, В. В. Никитин // Russian Electrical Engineering. – 2021. – Vol. 92. – P. 550–554.
5. Цихалевский, И. Асинхронные приводные двигатели с различным числом фаз / И. Цихалевский, К. Вахрушев // AIP 2442: материалы конф., Грозный, 25 июня 2021 г. – Грозный, 2021. – С. 070006. – doi.org/10.1063/5.0075619.
6. Хакимов, С. Х. Энергосберегающие технологии контактов электрических аппаратов в энергетическом строительстве / С. Х. Хакимов, С. Н. Каюмов // Инновационные технологии в водном, коммунальном хозяйстве и водном транспорте: материалы II Респ. науч.-техн. конф., Минск, 28–29 апр. 2022 г. – Минск: БНТУ, 2022. – С. 289–294.
7. Akhmedov, A. P. Innovative public transport stop with autonomous power supply / A. P. Akhmedov, S. B. Khudoyberganov, N. P. Yurkevich // Инновационные технологии в водном, коммунальном хозяйстве и водном транспорте: материалы II Респ. науч.-техн. конф., Минск, 28–29 апр. 2022 г. – Минск: БНТУ, 2022. – С. 181–184.

УДК 621.3.011

Методы эффективного управления тяговым электроприводом

Колесников И. К., Хакимов С. Х.
Ташкентский государственный транспортный университет
Ташкент, Республика Узбекистан

В статье рассмотрены способ управления тяговым электроприводом, способ скалярного управления асинхронного двигателя, а также найдены векторные системы управления электроприводами с прямым измерением

контролируемых величин с помощью датчиков и с помощью математической модели электродвигателя. Для реализации математической модели была принята T-образная схема замещения асинхронного двигателя.

Основными способами оптимальной системой управления тяговым электроприводом являются: скалярное управление, частотно-токовое управление, классическое векторное управление, прямое управление моментом.

Скалярным управлением асинхронным двигателем является способ, основанный на изменении скалярных величин (модулей) частоты, напряжения, токов, магнитных потоков. При таком управлении частота является независимой величиной, а значения напряжения при данной частоте определяет характеристику механической величины.

При регулировании асинхронных электроприводов с диапазоном регулирования до $D = 100:1$, для частотных пусков, торможения и реверсов применяют системы с частотно-токовым управлением. Если диапазон регулирования скорости $D = 10:1$ при статическом моменте $S_m = 5-10\%$ применяют частотно-параметрическое регулирование скорости.

Для построения высококачественных замкнутых систем регулирования электроприводов, где электрическую машину представляют, как динамический объект, применяют систему асинхронного электропривода с частотно-векторным регулированием скорости.

Все системы управления электроприводом с прямыми изменением позволяют качественно регулировать координаты электропривода. Это связано с тем, что параметры электродвигателя меняются в процессе эксплуатации и отличаются от паспортных значений. Это может привести к ошибкам измерения. Векторные системы описываются уравнением электромагнитного момента электродвигателя

$$\bar{M} = \frac{3}{2} P_n C (a \times b),$$

где P_n – количество пар полюсов; a, b – момент-образующие вектора; C – коэффициент.

Коэффициент C определяется от выбранных момента образующих векторов с помощью табл., где $k_1 = L_m/L_i$; $k_2 = L_m/L_2$; $\sigma = 1 - k_1 k_2$. Это коэффициенты электромагнитной связи статора и ротора и коэффициент рассеяния.

Определение коэффициента C

		b				
		Ψ_1	i_1	Ψ_2	i_2	Ψ_m
a	Ψ_1	*	1	$-k_1 k_2 / \sigma L_m$	$-k_1$	*
	i_1	-1	*	$-k_2$	$-L_m$	-1
	Ψ_2	$k_1 k_2 / \sigma L_m$	k_2	*	-1	*
	i_2	k_1	L_m	1	*	1
	Ψ_m	*	1	*	-1	*

В системе управления ток статора используется, как момент образующий. По мгновенным значениям тока и напряжения статора определяем поток сцепление статора и главное поток сцепления. Функциональная система электропривода с прямым управлением показано на рис. 1.

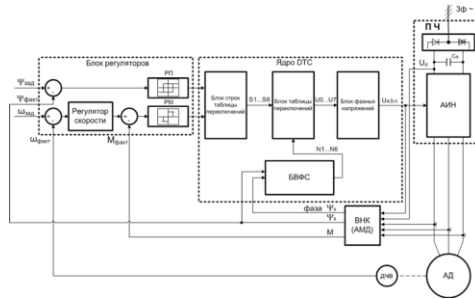


Рис. 1. Функциональная схема с прямым управлением электропривода

Система электропривода с прямым управлением не предполагает многократного преобразования координат система электропривода с прямым управлением состоит из блоков регулятора, таблицы переключений, вычислительного блока фазового сектора, формирователя фазных напряжений, адаптивной модели двигателя. Для снижения магнитного потока используется IR-компенсация, при котором $V/f = \text{const}$.

Закон частотного управления электроприводом с учётом IR-компенсации показан на рис 2.

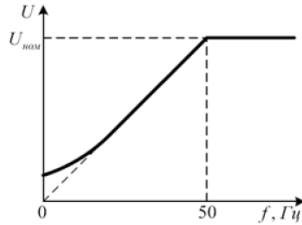


Рис. 2. Закон частотного управления электроприводом с учётом компенсации

При работе на низких частотах влияние на изменение сопротивления обмоток статора влияет поверхностный эффект, который показывает воздействие на работу электропривода.

Повышение температуры обмоток асинхронного двигателя изменяет электромеханические характеристики и параметры системы управления. Поэтому вводится блок IR-компенсации. Система прямого управления моментом DTC (direct torque control) является оптимальным решением.

Силовая схема асинхронного электропривода представлена рис 3.

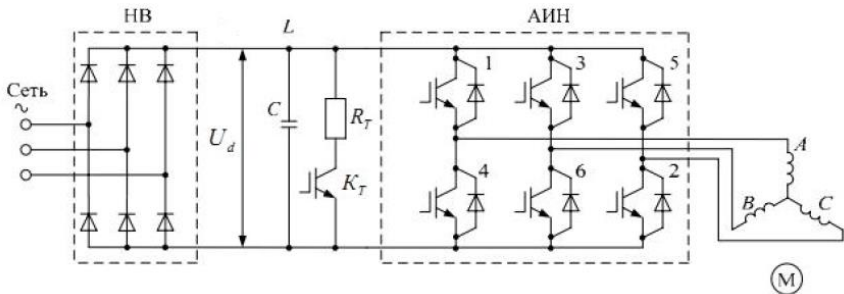


Рис. 3. Силовая схема асинхронного электропривода

Силовая схема включает преобразователь частоты, в который входит автономный инвертор и неуправляемый выпрямитель. В качестве момента-образующих взято: потокосцепление ротора и ток статора; главное потокосцепление и ток статора.

Угол между векторами тока статора и потокосцепления взят 45° при отсутствии насыщения магнитной цепи. Между остальными парами момента-образующих взято из векторной диаграммы (рис. 4).

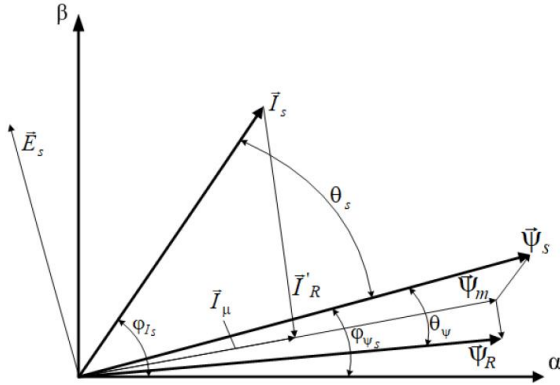


Рис. 4. Векторная диаграмма потокоцепления и токов асинхронного электродвигателя

Алгоритм минимума потребляемой мощности может быть реализован в электроприводах с постоянной нагрузкой. При построении энергосберегающего алгоритма необходимо учесть, что критический момент

$$M_m = \pm \frac{pm_1 U_1^2}{2\omega_1 \left[\pm r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_{\sigma 1} + x'_{\sigma 2})^2} \right]},$$

где U_1 – действующее значение фазного напряжения асинхронного двигателя; $\omega_1 = 2\pi f_1$ – угловая частота фазного тока; p – число пар полюсов; m_1 – число фаз обмоток статора; $r_1, r_2, x_{\sigma 1}, x_{\sigma 2}$ – параметры Т-образной схемы замещения АД.

При уменьшении потока (напряжения) снижается перегрузочная способность асинхронного двигателя. При этом осуществляется энергоэффективное управление. Уравнение электромагнитного момента асинхронного двигателя с учётом магнитообразующих

$$M = \frac{3}{2} P_n |I_s| |\Psi_s| \sin \theta_s,$$

где θ_s – угол между векторами тока статора I_s и потокоцепления статора Ψ_s .

Для реализации математической модели была принята Т-образная схема замещения асинхронного двигателя (рис 5).

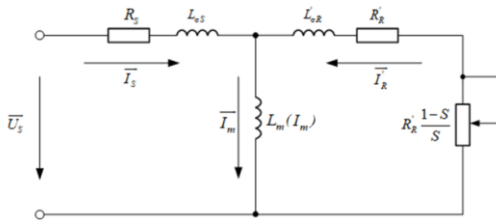


Рис. 5. Т-образная схема замещения асинхронного двигателя

Система математической модели асинхронного двигателя:

$$\begin{cases} \bar{U}_S = R_S \bar{I}_S + \frac{d\bar{\Psi}_S}{dt} + j\omega_k \bar{\Psi}_S \\ \bar{U}_R = R'_R \bar{I}'_R + \frac{d\bar{\Psi}_R}{dt} + j(\omega_k - \omega) \bar{\Psi}_R, \\ \bar{\Psi}_S = L_S \bar{I}_S + L_m \bar{I}'_R \\ \bar{\Psi}_R = L_m \bar{I}_S + L'_R \bar{I}'_R \end{cases}$$

где \bar{U}_R – вектор напряжения ротора; R'_R – приведенное активное сопротивление ротора; \bar{I}'_R – приведенный ток ротора; $\bar{\Psi}_R$ – вектор потокоцепления ротора; \bar{U}_S – вектор напряжения статора; R_S – сопротивление статора; \bar{I}_S – вектор тока статора; $\bar{\Psi}_S$ – вектор потокоцепления статора; ω_1 – угловая частота магнитного поля вращения статора; ω – угловая частота вращения ротора; L_m – приведенная взаимная индуктивность между статором и ротором; L_S – индуктивность фазы статора $L_S = L_m + L_{\sigma S}$; $L_{\sigma S}$ – индуктивность рассеяния статора; L'_R – приведенная индуктивность фазы ротора; $L'_{\sigma R}$ – индуктивность рассеяния ротора (приведенная).

Уравнения в системе d - q , связанной с полем ротора с учётом Т-образной схемы замещения, принимает вид

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{Sd} = R_S I_{Sd} + \frac{d\Psi_{Sd}}{dt} - j\omega_k \Psi_{Sq} \\ U_{Sq} = R_S I_{Sq} + \frac{d\Psi_{Sq}}{dt} + j\omega_k \Psi_{Sd} \\ 0 = R_R I_{Rd} + \frac{d\Psi_{rd}}{dt} - (\omega_k - \omega) \Psi_{rq} \\ 0 = R_R I_{rq} + \frac{d\Psi_{rq}}{dt} - (\omega_k - \omega) \Psi_{Rd} \\ \bar{I}_m = \bar{I}_S + \bar{I}_R \\ \bar{\Psi}_S = \bar{\Psi}_m + \bar{\Psi}_{\sigma S} \\ \bar{\Psi}_R = \bar{\Psi}_m + \bar{\Psi}_{\sigma R} \\ \bar{\Psi}_m = L_m \bar{I}_m \end{array} \right.$$

Векторная диаграмма представлена на рис. 6.

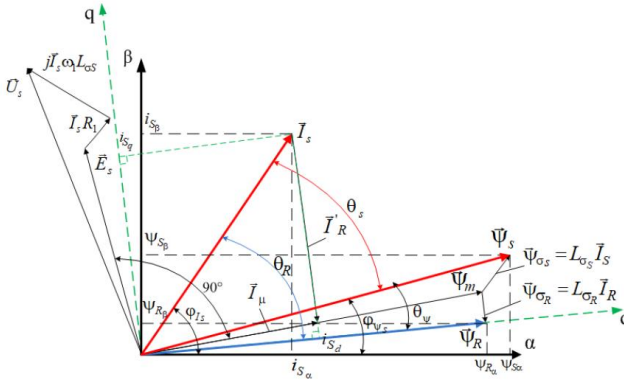


Рис. 6. Векторная диаграмма АД в осях α - β и d - q

Векторная диаграмма (рис 6) использует неподвижную систему α - β и моментобразующую систему векторов: ток статора и потокосцепления статора [1–3].

Была разработана функциональная схема энергоэффективной системы прямого управления моментом асинхронного двигателя (рис. 7).

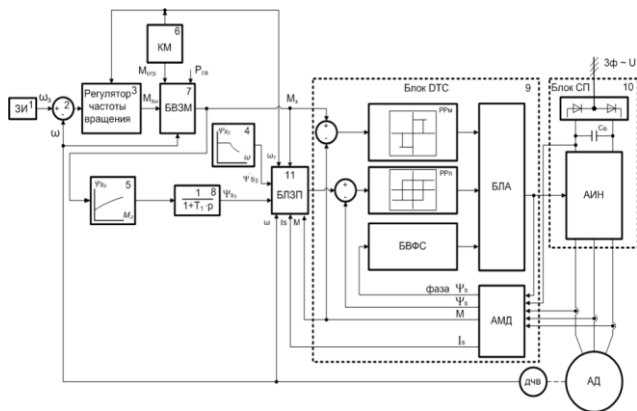


Рис. 7. Энергоэффективная функциональная система прямого управления асинхронным двигателем

Функциональная система состоит из задания скорости ω_3 (блок 1), который поступает из системы верхнего уровня, затем заданная скорость из контроллера машиниста поступает в блок вычисления задания скорости БВЗС. Этот блок определяет ограничение на частоту, а также задаёт ускорения колёсных пар a_i или a_0 . Ускорения формируются в блоке адаптации БАУ, где a_i направлена на увеличение в режиме тяги, а a_0 – снижение ускорения в режиме тяги.

В тяговом режиме

$$a_1 = a_1 + \Delta a_{k1},$$

$$a_0 = a_1 + \Delta a_{k2}.$$

В тормозном режиме

$$a_1 = a_1 - \Delta a_{k1},$$

$$a_0 = a_1 + \Delta a_{k2},$$

где a_1 – ускорение локомотива; a_1 и a_2 – задание на ускорение колёс; Δa_{k1} , Δa_{k2} определяются условием движения.

Блок логики задания потокосцепления (БЛЗП) позволяет переход от традиционного изменения потокосцепления к энергосберегающему закону (и обратно). Алгоритм функционирования БЛЗП показан на рис. 8.

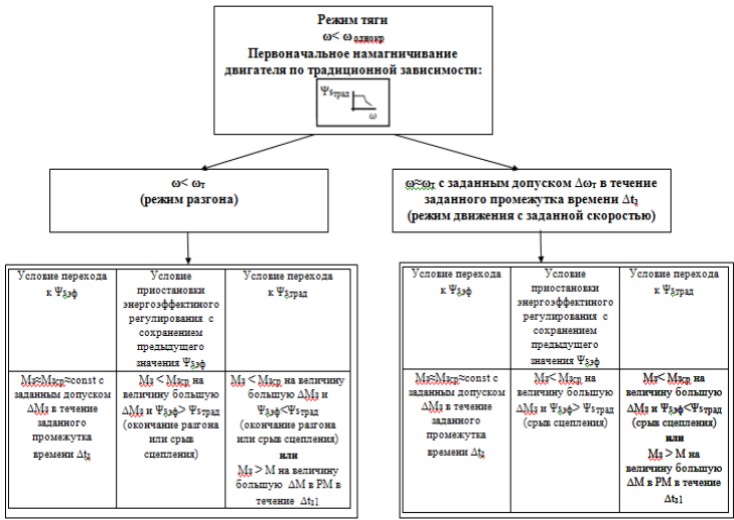


Рис. 8. Алгоритм функционирования блока логики задания потокосцепления

Алгоритм БЛЗП работает энергоэффективно только в режиме тяги: при разгоне и при постоянной скорости в течении некоторого заданного промежутка времени. Для математической модели системы тягового двигателя была разработана компьютерная модель в программном комплексе Matlab/Simulink (рис. 9) [4].

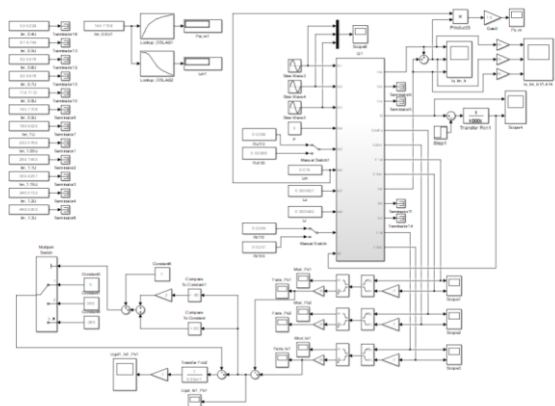


Рис. 9. Компьютерная модель асинхронного двигателя в Matlab/Simulink

Результаты моделирования представлены на рис. 10, 11.

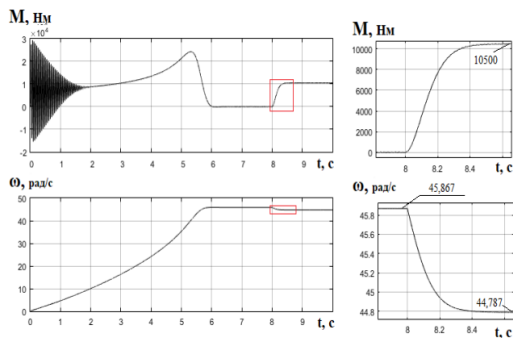


Рис. 10. Результаты моделирования зависимости ЭМ момента и частоты вращения от времени

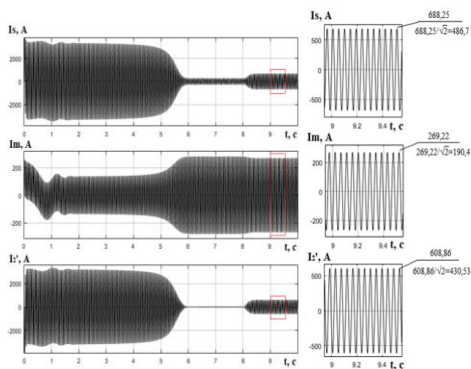


Рис. 11. Результаты моделирования зависимости тока статора, намагничивания и ротора от времени

Была также разработана модель тягового электропривода с энергоэффективным прямым управлением моментом (рис 12.) [5–7].

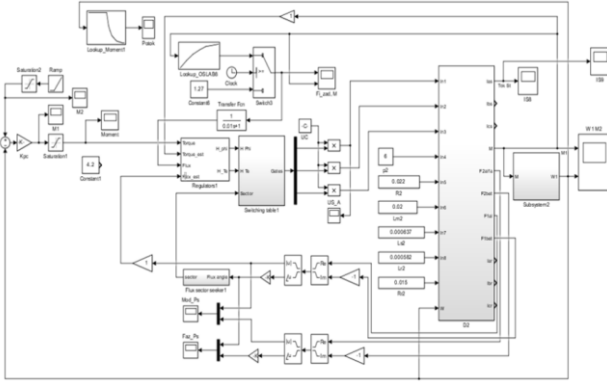


Рис. 12. Модель тягового электропривода с энергоэффективным прямым управлением

Результаты моделирования разгона тягового электропривода с применением энергоэффективного управления показано на рис. 13.

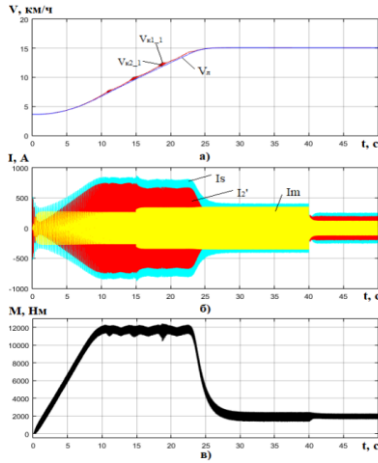


Рис. 13. Результаты моделирования с применением энергоэффективного управления:
a – скорости колес; *б* – тока статора, приведенный ток ротора и ток намагничивания; *в* – электромагнитный момент

Для энергоэффективного управления были получены зависимости КПД от момента (рис. 14).

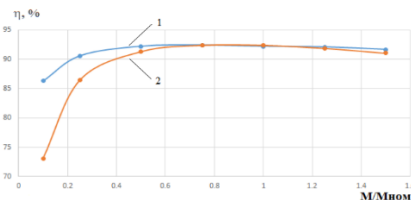


Рис. 14. Зависимость КПД от момента при энергоэффективном управлении: 1 – при энергоэффективном управлении; 2 – при обычном управлении [6; 7]

По результатам работы можно сделать следующие выводы:

1. Разработаны компьютерные модели асинхронного тягового электропривода с энергоэффективным управлением.
2. Определены способы моделирования статических и динамических режимов тягового электропривода.
3. Разработана математическая модель тягового электропривода с использованием энергоэффективного прямого измерения контролируемых величин.

Литература

1. Kolesnikov, I. K. The Choice of a Generalized Criterion for the Efficiency of an Automated Electric Drive of a Railway Rolling Stock / I. K. Kolesnikov, G. S. Abidova, S. H. Khakimov // Intelligent System for Industrial Automation (WCIS-2022): Proceeding of 12th World Conference WCIS 2022. Lecture Notes in Networks and Systems. – 2022. – Vol. 912. Springer. – Cham. – doi.org/10.1007/978-3-031-53488-1_34.
2. Berdiev U. T. Elektr transportining elektr va electron uskunalari / U. T. Berdiev, B. H. Hushboqov, S. N. Kayumov. – Darslik. – Ташкент: Sams ASA, 2014. – 212 с.
3. Петрушин, А. Д. Оптимальное частотное управление асинхронными тяговыми двигателями электропоездов / А. Д. Петрушин, Т. С. Титова, В. В. Никитин // Russian Electrical Engineering. – 2021. – Т. 92, № 10. – С. 550–554.
4. Berdiev, U. T. Methods of new technological developments of electric motors based on soft magnetic materials / U. T. Berdiev, I. K. Kolesnikov, M. N. Tuychieva, F. F. Khasanov, U. B. Sulaymonov // E3S Web of Conf. – EDP Sciences, 2023. – Vol. 401. – P. 03038.

5. Цихалевский, И. Асинхронные приводные двигатели с различным числом фаз / И. Цихалевский, К. Вахрушев // АИР 2442: материалы конф., 13 дек. 2021 г. – 2021. – С. 070006. – <https://doi.org/10.1063/5.0075619>.

6. K. Kolesnikov, A. P. Akhmedov, S. N. Nakimov. Electric drive efficiency criterion for specific energy consumption. Инновационные технологии в водном, коммунальном хозяйстве и водном транспорте: материалы III республиканской научно-технической конференции, 27–28 апреля 2023 г. / редкол.: С. В. Харитончик [и др.]. – Минск: БНТУ, 2023. – С. 408–411.

7. Нос, О. В. Оптимальное векторное управление асинхронным двигателем по критерию минимума токов статора / О. В. Нос // Электротехника, электромеханика и электротехнология ЭЭЭ–2007: материалы III научн.-тех. конф. – Новосибирск; НГТУ, 2007. – С. 79–85.

УДК 629.423.31

Повышение энергоэффективности источников вторичного питания в схеме управления тяговым приводом электроподвижного состава

Иксар Е. В.

Ташкентский государственный транспортный университет
Ташкент, Республика Узбекистан

Быстрые темпы роста элементной базы силовой электроники способствует стремительному развитию систем управления движением скоростного подвижного состава. Для формирования питания силовых преобразовательных устройств тягового привода электроподвижного состава используются инверторы на IGBT модулях. Эффективность использования электрической энергии, потребляемой схемой управления, можно повысить, используя в этих схемах ключей с распределенным электростатическим управлением (КРЭУ), в статье приведен сравнительный анализ существующих и предлагаемых систем. Работа преобразовательных устройств основана на принципе высокочастотного преобразования электрической энергии. Повышение частоты коммутации влечёт за собой повышение динамических потерь в элементах преобразования (транзисторы, трансформатор, диоды и т. д.). Использование импульсных преобразователей на (КРЭУ) позволяет снизить динамические потери на полупроводниковых силовых ключах, повысить удельные характеристики импульсных источников вторичного электропитания.

В настоящей статье представлен материал о перспективной системе управления на основе интегрально-амплитудной импульсной модуляции четырехуровневым инвертором напряжения на базе ключей с распре-