

## TRACTION ELECTRIC DRIVE CONTROL ALGORITHM IN MODES UNDER NON-STANDARD SITUATIONS

**Kolesnikov I.K., Tuychieva M.N.**

Tashkent State Transport University (Tashkent, Uzbekistan)

**Abstract:** The article deals with the development of control algorithms for traction electric drive in modes under non-standard situations. The functional scheme of traction electric drive of electric locomotive with individual regulation is proposed. The regulation was carried out by scalar and vector systems, which made it possible to determine not only the modules, but also the location of the vectors in the coordinate system. As a result of the proposed simulation, electromagnetic moments decreased and velocity fluctuations disappeared. The proposed functional vector system made it possible to jointly regulate all motors when powered by an autonomous inverter.

**Keywords:** traction forces, non-standard situation, control algorithm, functional diagram, traction electric drive, coupling coefficient, regulation of asynchronous electric motor, classification of algorithms, scalar control, electromagnetic torque

## АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ТЯГОВЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ В РЕЖИМАХ ПРИ НЕСТАНДАРТНЫХ СИТУАЦИЯХ

**Колесников И.К., Туйчиева М.Н.**

Ташкентский государственный транспортный университет (Ташкент, Узбекистан)

**Аннотация:** В статье рассмотрены вопросы разработки алгоритмов управления тяговым электроприводом в режимах при нестандартных ситуациях. Предложена функциональная схема тягового электропривода электровоза с индивидуальным регулированием. Регулирование произведено скалярными системами и векторными, которые позволили определить не только модули, но и расположение векторов в системе координат. В результате предложенного моделирования снизились электромагнитные моменты и пропали колебания скорости. Предложенная функциональная векторная система позволила совместно регулировать все двигатели при питании от автономного инвертора.

**Ключевые слова:** тяговая усилия, нестандартная ситуация, алгоритм управления, функциональная схема, тяговый электропривод, коэффициент сцепления, регулирование асинхронного электродвигателя, классификация алгоритмов, скалярное управление, электромагнитный момент

В нашей республике большое внимание уделяют развитию транспортной инфраструктуре, увеличению железнодорожных электрифицированных участков и устранению сбоев при нестандартных и аварийных ситуациях в системах работы подвижного состава, повышению эффективности использования железнодорожных линий высокоскоростного движения. В Стратегии развития Нового Узбекистана на 2022 - 2026 годы определены такие задачи, как: «...развитие единой транспортной системы во взаимосвязи со всеми видами транспорта, ...ускорение проекта строительства новых скоростных железнодорожных линий». С этой точки зрения, в частности, усовершенствование методов и устройств устранения сбоев в системах эксплуатации подвижного состава железнодорожного транспорта, разработка новых современных математических моделей для предотвращения аварийных и нестандартных ситуаций и сбоев в электроприводах локомотивных устройств электровозов, а также разработка оптимальных устройств управления контроля и диагностики элементов подвижного состава с программным обеспечением систем является

основной задачей безопасности движения.

Алгоритмы реализаций нестандартных режимов предельных тяговых усилий делятся на две группы.

Первая группа состоит из алгоритмов защиты от боксования. Эта группа алгоритмов начинает работать только, когда есть боксование. Эта система обнаруживает, а затем подавляет боксование. Вторая группа алгоритмов позволяет достигать максимальных тяговых усилий, что обеспечивает локомотиву надежно трогаться с места и помогает движению тяжеловесных составов при неблагоприятных условиях.

При разработке современных алгоритмов управления тяговым электродвигателем были использованы тормозные и тяговые усилия, которые определяются коэффициентом сцепления между колесами и рельсами.

$$F = \psi N, (1)$$

где  $N$  – вертикальная нагрузка на колеса.

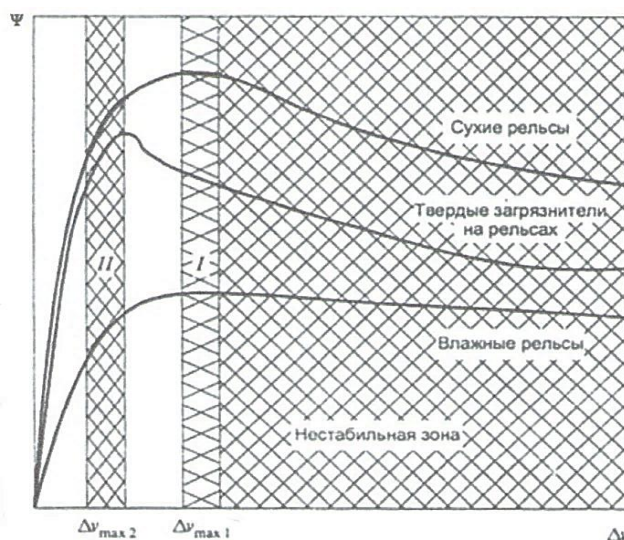
В расчётах используют относительный коэффициент сцепления, который определяется отношением коэффициента сцепления  $\psi$  к максимально возможному потенциальному коэффициенту  $\psi_0$

$$K = \frac{\psi}{\psi_0}. (2)$$

Скорость скольжение определяется по формуле:

$$V_{ск} \% = \frac{V_k - V_l}{V_l} \cdot 100\%, (3)$$

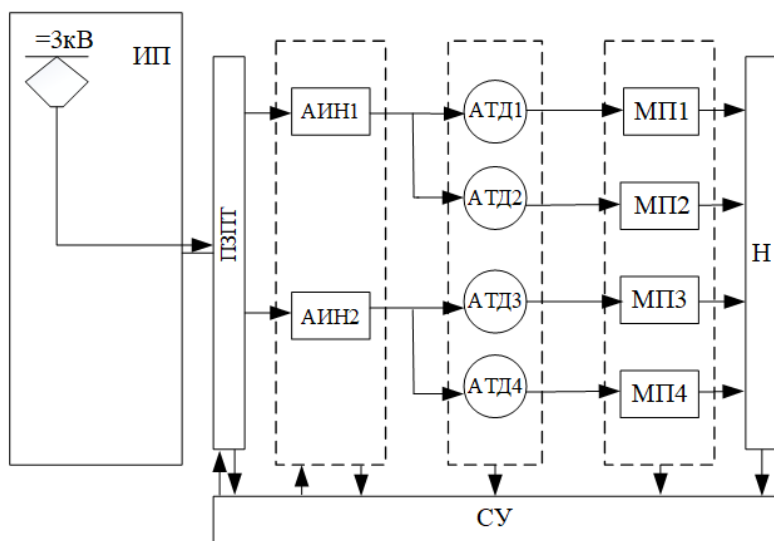
где  $V_{ск}$  – скорость скольжения;  $V_l$  – линейная скорость локомотива;  $V_k$  – линейная скорость на ободу колеса. Были получены экспериментальные характеристики значения коэффициента при различных состояниях рельсов.



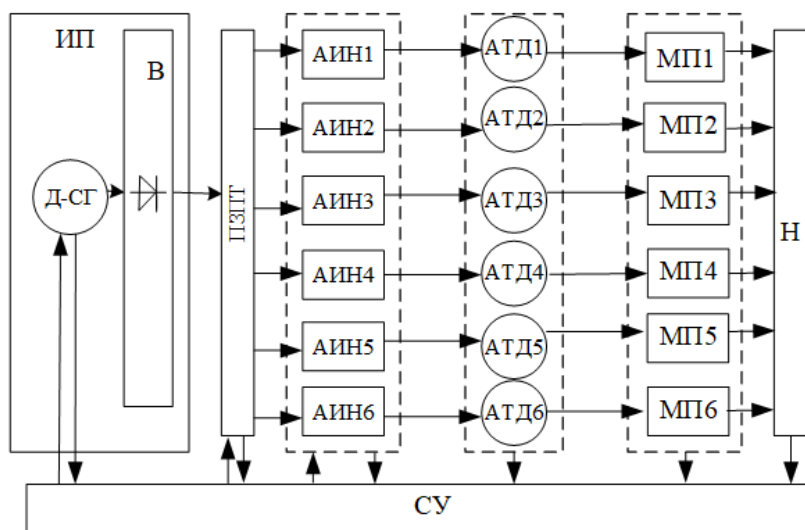
**Рис.1. Экспериментальные значения коэффициента сцепления при различных состояниях рельсов**

Падающий участок характеристики (рис.1) соответствует зоне боксования. За счет снижения тягового усилия возникают колебания механической системы, что приводит к нестандартной ситуации.

Обычно тяговые двигатели питаются от автономного инвертора напряжения (рис.2), который поддерживает стабильное напряжение к частоте. Каждая тележка локомотива подключается к одному источнику. В этом случае очень трудно обеспечить максимум характеристики сцепления, поэтому применяют отдельные инверторы, которые питают каждый двигатель в отдельности (рис.3).

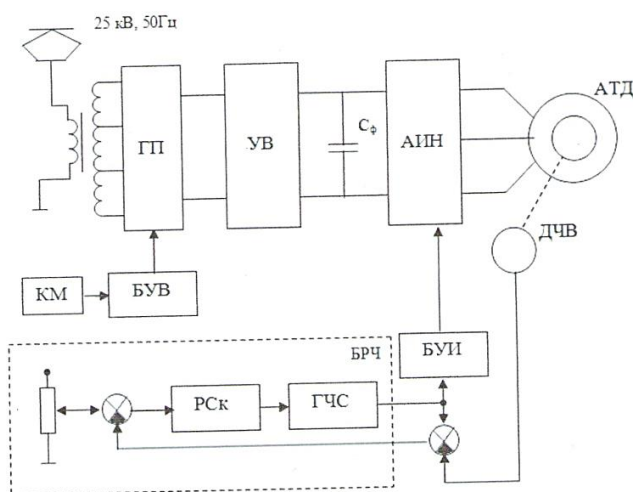


**Рис.2. Функциональная схема регулирования электроприводом электровоза с по тележечном регулировании асинхронного двигателя.**



**Рис.3. Функциональная схема индивидуального регулирования осей асинхронного электропривода.**

Предложена функциональная схема для тягового электропривода электровоза с индивидуальным регулированием (рис.4).



**Рис.4. Функциональная регулирование асинхронного двигателя**

В эту схему входят: управляемый инвертор (УВ), автономный инвертор напряжения (АИН), блоки управления выпрямителем (БУВ), управления инвертором (БУИ), контроллер машиниста (КМ), блок регулирования частоты, который обеспечивает постоянство скольжения в процессе разгона; генератор частоты (ГЧС), датчик частоты (ДЧ). При помощи управления выпрямителя по сигналам контроллера машиниста регулируется напряжение статора асинхронного двигателя. При помощи обратной связи этот сигнал воздействует на выходное напряжения блока управления вентилями.

Управления асинхронными двигателями разбиваются на три части или три большие группы (рис.5).



**Рис.5. Управления асинхронными двигателями**

Основные группы системы: скалярные системы, векторные и системы с разрывным управлением.

Регулирование только модулей векторов тягового электродвигателя обычно производят скалярными системами, а векторное регулирование позволяет определить не только модули, но и расположение векторов в системе координат. Предлагаемые системы с разрывным управлением позволяют регулировать не только модуль вектора, но и сектор плоскости в котором он находится. Сравнительные характеристики представлены в таблице 1.

**Таблица 1.**

**Характеристики систем управления**

Вид системы управления Параметр	Скалярная система управления по принципу $U/f = const$ (без Д4В)	Векторная система управления с подчиненным регулированием (с Д4В)	СУ с разрывным управлением	
			ДТС (СД4В)	ДТС (без Д4В)
Время нарастания мс	150	10 ÷ 20	1 ÷ 2	1 ÷ 2
Статическая ошибка %	±(1 ÷ 3)	±0,01	±0,01	±(0,1 ÷ 0,5)
Динамическая ошибка %	3	0,3	0,1	0,4

Как видно из таблицы наилучшими характеристиками обладают системы диагностики транспортных систем с датчиком частоты вращения. В связи с этим они могут быть применены в системах тягового электропривода с асинхронными двигателями для регулирования момента и скорости при нестандартных режимах работы локомотива.

Результат алгоритма приближенного определения максимума показана на рис.6.

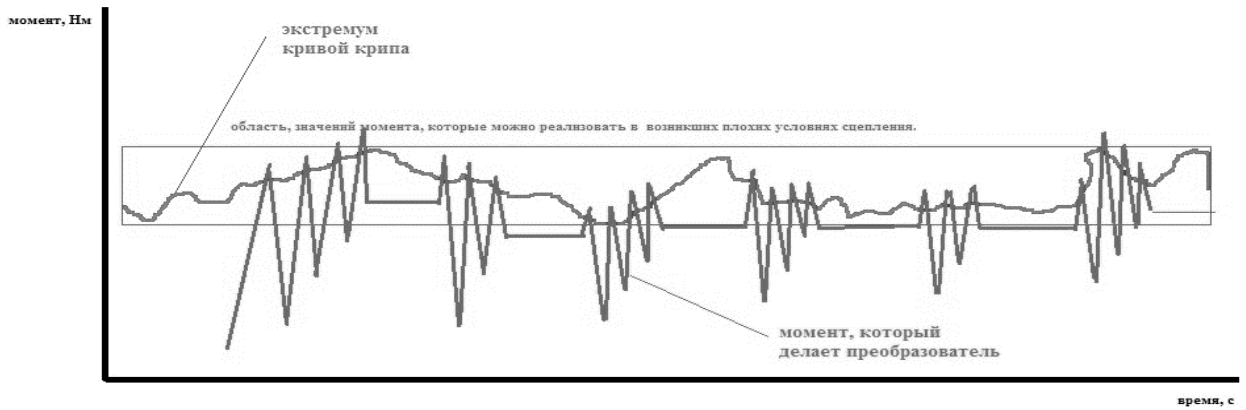


Рис.6. Результаты моделирования по алгоритму определения максимума сцепления

Классификация алгоритмов представлена на рис.7.

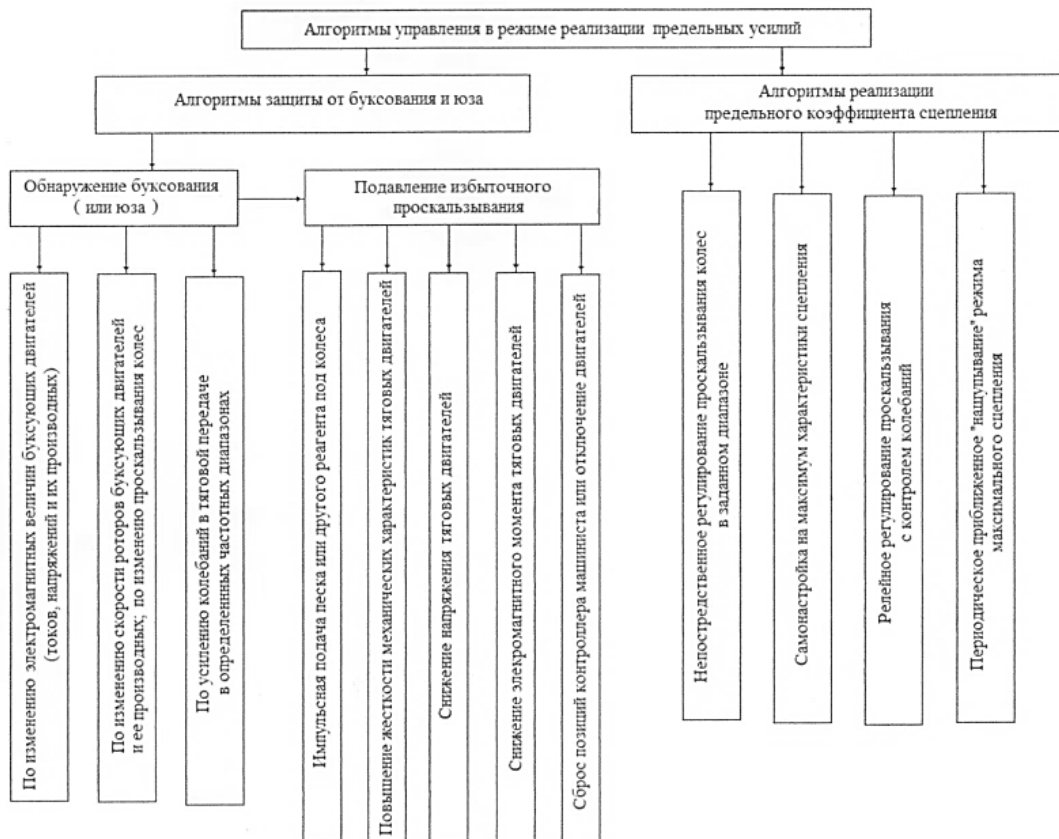


Рис.7. Алгоритмы управления тяговым электроприводом

Для дальнейшего исследования тягового привода был принят алгоритм по изменению электромагнитных величин токов, напряжений.

В системах управления тяговым электроприводом существует связь между необходимой частотой  $f_2$ , значением частоты статора  $f_1$  и частотой вращения ротора  $f_{вр}$ :

$$f_1 = f_{вр} \pm f_2. \quad (4)$$

Знак «+» применяют в режиме тяги; «-» в режиме торможения. Законом скалярного управления будет соотношение:

$$\frac{V_s}{f_1} = const. \quad (5)$$

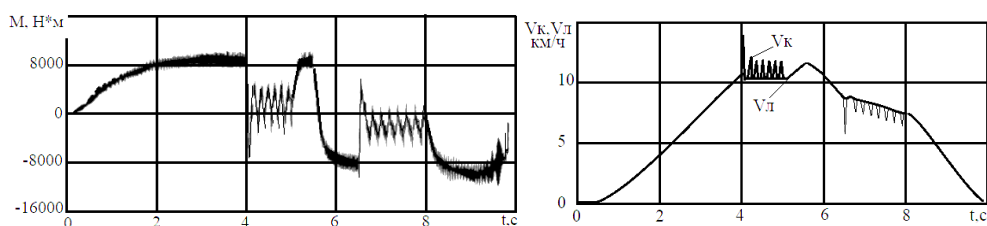
Это соотношение известно, как закон М.П. Костенко, в котором частота напряжения  $f_1$  регулируется по скорости вращения двигателя при боксовании [79].

При этом тяговая характеристика будет мягкой. В зоне постоянства мощности закон запишется в виде:

$$\frac{V_S}{\sqrt{f_1}} = const. \quad (6)$$

С помощью выбранного алгоритма получены результаты моделирования при разгоне и торможении, в качестве параметров взяты электромагнитный момент и скорость асинхронного двигателя. Результаты моделирования при разгоне и торможении показали необходимость регулировать электродвигатель по частоте.

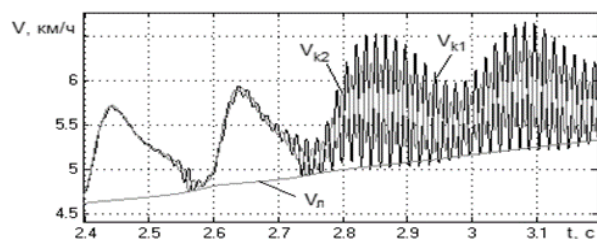
На рисунке 8 показаны характеристики при скалярном управлении.



**Рис. 8. Результаты моделирования разгона и торможения при скалярном управлении**

Возникновение релаксационных колебаний может привести к нестандартным режимам работы локомотива. Они вызваны тем, что рабочая точка находится в неустойчивом состоянии, т.е. попадает на ниспадающий участок. Это может вызвать уменьшение электромагнитного момента по характеристике асинхронного двигателя. Затем электромагнитный момент восстанавливается, а потом опять срывается. Если не предпринять меры к снижению момента, то может наступить нестандартные ситуации.

Нестандартные ситуации могут возникнуть при наложении механических колебаний колес и релаксационных колебаний, которые показаны на рисунке 9.

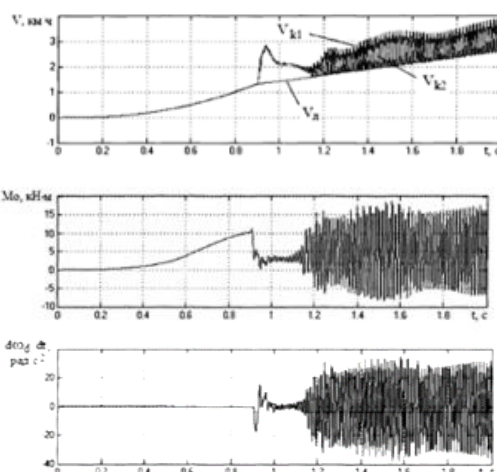


**Рис.9. Результаты моделирования разгона локомотива при скалярном управлении**

Результаты моделирования при скалярном управлении дают возможность предусмотреть дозирование снижение электромагнитного момента системы управления подвижным составом.

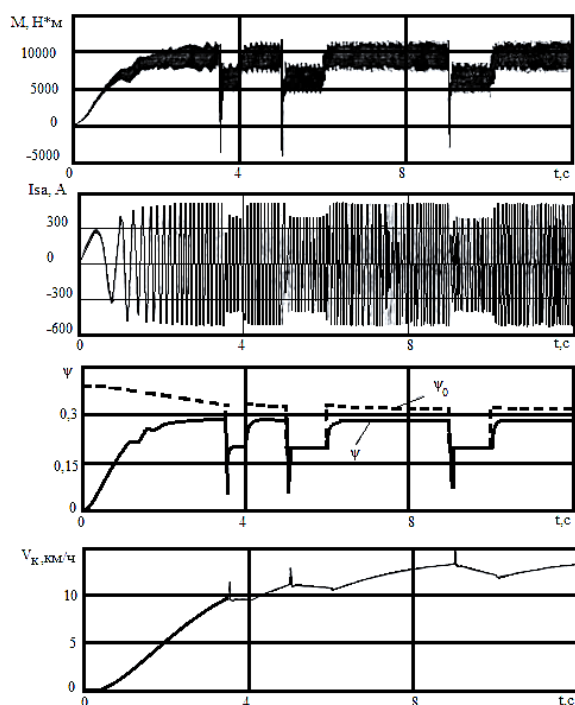
При плохих условиях сцепления колес в результате моделирования стало возможным увеличить частоту сигналу до 67 Гц и изменить частоту изменения виброускорения корпуса до 10-15Гц. Это дало возможность обнаружить боксование на ранней стадии и провести коррекцию амплитуду напряжения с целью изменение скорости скольжения колес.

Результаты моделирования при выбранной коррекции амплитуды при скалярном управлении показаны на рисунке 10.



**Рис.10. Результаты моделирования при скалярном управлении при плохих условиях сцепления**

В результате нашей коррекции снизились электромагнитные моменты, а колебания скорости пропали. Это позволило автоматически заменить напряжения и снизить момент до нормального уровня (рис. 11).

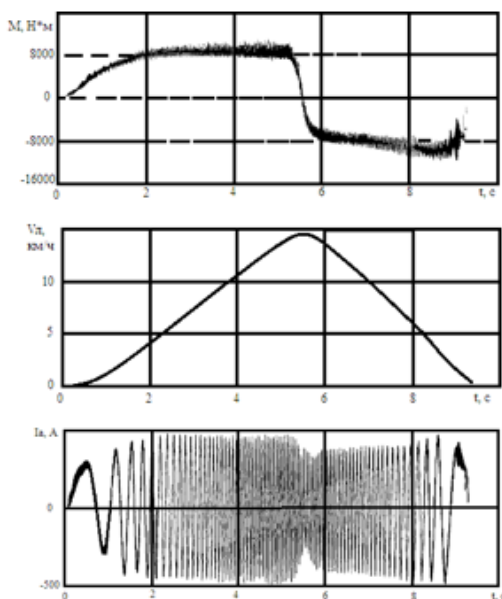


**Рис.11. Результаты моделирования электровоза с асинхронным двигателем с учетом коррекции напряжения при скалярном управлении.**

При векторном управлении потокосцепление ротора и электромагнитный момент асинхронного тягового двигателя рассматриваются и исследуются отдельно друг от друга. Все это обеспечивает качественное динамичное управление асинхронным тяговым двигателем.

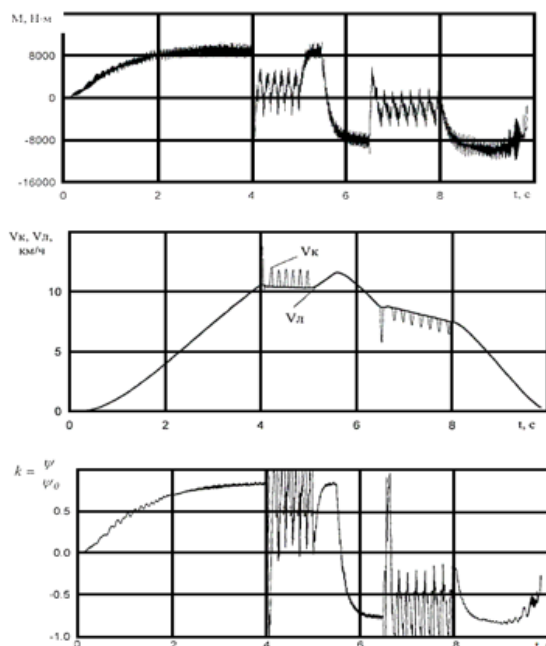
При нестандартных ситуациях работы тягового электропривода локомотива была составлена функциональная векторная система при совместном регулировании всех двигателей при питании от автономного инвертора. Эта схема представлена на рисунке 12.





**Рис.13. Результаты моделирования при векторной системе управления тяговым электроприводом при нормальном сцеплении (разгон и торможения)**

Результат моделирования установившегося режима и торможения при снижении коэффициента сцепления до  $\psi_0 = 0,1$  в интервале  $4c \leq t \leq 5c$  и  $6,5c \leq t \leq 8c$  при векторном управлении представлены на рис.14.



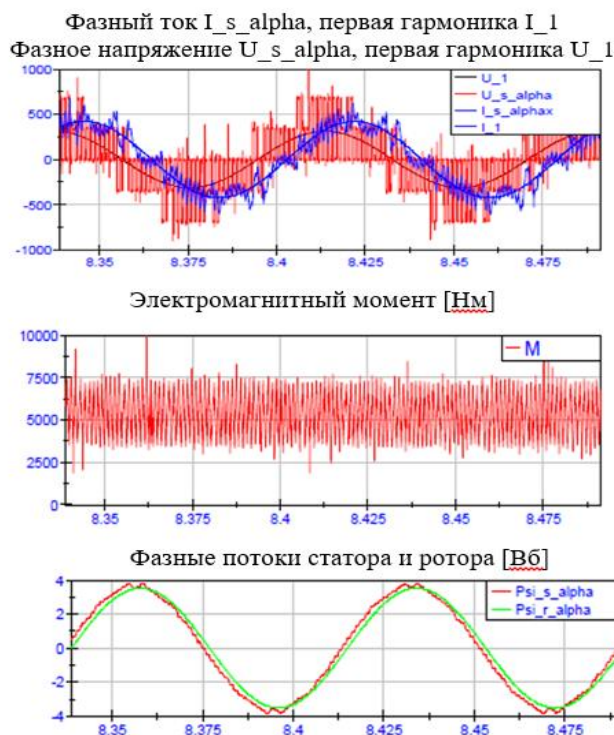
**Рис.14. Результат моделирования установившегося режима и торможения при снижении до  $\psi_0 = 0,1$  при векторном управлении**

Достоверность результатов моделирования в количественном отношении была получена сравнением расчетных осциллограмм (рис.4.28)

Моделирование происходило при тех же значениях, как и в эксперименте и расчете при напряжении 1030 В, потоке 3,7 В, скорости локомотива 11,5 км/ч, тока и напряжения по первой гармонике 424 А, 313,3 В, при частоте 13,12 Гц и вращения ротора  $n=257,1$  об/мин, скольжении

0,261 Гц,  $M=5365 \text{ Н*м}$ , при активной мощности 160,7 кВт и действующим значением тока 311,6 А, пиковым значением тока 610 А.

Динамика тягового электропривода проведена в подсистеме Matlab/Simulink. Реализация предельных усилий с регулированием скорости ротора по линейной скорости локомотива обеспечивает максимальный коэффициент сцепления.



**Рис.15. Экспериментальные осциллограммы испытания локомотива.**

Динамика тягового электропривода проведена в подсистеме Matlab/Simulink. Реализация предельных усилий с регулированием скорости ротора по линейной скорости локомотива обеспечивает максимальный коэффициент сцепления.

Таким образом, реализован алгоритм нестандартных режимов предельных тяговых усилий который позволил рассчитать относительный коэффициент сцепления и скорость скольжения при различных состояниях рельсов; разработаны функциональные схемы регулирования, асинхронного двигателя которые позволили регулировать модули векторов в скалярных системах и расположений векторов системы координат при векторном управлении; результаты моделирования позволили при разгоне и торможения при скалярном управлении регулировать момент и скорость при нестандартных режима; моделирование процессов в тяговом электроприводе в Matlab/Simulink, позволило реализовать предельные усилия с регулированием скорости ротора по линейной скорости локомотива и обеспечить максимальный коэффициент сцепления.

### Литература

1. Бердиев У.Т., Колесников И.К., Туйчиева М.Н. функциональная диагностика схемы управления при нестандартных ситуациях в тяговом режиме электровозов. Монография. Т.: «Ziyo nashr-matbaa», 2023. -148 с.
2. Плак А.В., Раджибаев Д.О., Турсунов Х.М., Новый пассажирский электровоз серии «O'Z-Y», Журнал «Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока», №1, 2011.
3. Кулинич Ю.М., Сергеев А.Ю. Моделирование работы тягового двигателя. Вестник ВНИИЖТ. – том 78 №5. 2019. С. 39-45.

4. Мельников В.А. Алгоритмическая защита локомотивов /Локомотив/ - 2015. - №3. С. 8-10.
5. Смольянов И.А., Швыдкий Е.Д., Сарапулов Ф.Н. Моделирование тяговых линейных асинхронных двигателей транспортных систем. Екатеринбург. УГТУ-УПИ 2015. С. 330-337.
6. Семенов А.П., Семченко В.В., Хромов И.Ю. Мониторинг технического состояния электровоз переменного тока. // Микропроцессорные системы управления. №18(5) 2020. С. 62-89.
7. Семенов А.П., Семченко В.В., Хромов И.Ю. Мониторинг технического состояния электровозов переменного тока по расходу электроэнергии на тягу поездов. Мир транспорта. М том 18. №5. 2020. С. 62-89.
8. Berdiev U.T., Burkhankhodzhaev A.M., Tuychieva M.N., Iksar E.V. Investigation of energy indicators with asymmetry of the voltage of the power source of mainline electric locomotives of alternating current. // International Scientific Conference Construction Mechanics, Hydraulics & Water Resources Engineering. CONMECHYDRO 2021 AUTUMN SEASON. Tashkent/Uzbekistan on September 7-9, 2021.
9. Berdiev Usan, Burkhankhodzhaev Abitkhodja, Tuychieva Malika, Iksar Elena, Usmonov Komil. Investigation of energy indicators with asymmetry of the voltage of the power source of mainline electric locomotives of alternating current. RSES 2021 Rudenko International Conference "Methodological problems in reliability study of large energy systems". AIP Publishing. Scopus. 16.11.2021. №15307/05-03.
10. Burkhankhodjaev A.M., Tuychieva M.N., Iksar E.V., Yuldasheva D.M.. The increase of electric energy efficiency of the electric locomotives "Uzbekistan-yulovchi" in asymmetric modes. // International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology Vol. 8, Issue 3, March 2021 (05.00.00. p. 47. №47).
11. Burkhankhodjaev Abitkhodja, Tuychieva Malika, Elena Iksar, Kholbutayeva Kholjan, Nurmatov Baxtiyor. Investigation of the energy performance of electric locomotives in asymmetric modes. RSES 2021 Rudenko International Conference "Methodological problems in reliability study of large energy systems". AIP Publishing. Scopus. 16.11.2021. №15307/05-03
12. Strangas E.G. "Notes for an Introductory Course on Electrical Machines and Drives", MSU Electrical Machines and Drives Laboratory, USA, 2012.
13. Tuychieva M. Control of electric locomotives with asynchronous electric motors under asymmetric operating conditions in Uzbekistan. // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 614 (2020) 012060.
14. <https://tekhnosfera.com/diagnostirovanie-sistem-upravleniya-elektrovozov-peremennogo-toka-s-tiristornymi-preobrazovatelyami>
15. <https://www.dissercat.com/content/diagnostirovanie-sistem-upravleniya-elektrovozov-peremennogo-toka-s-tiristornymi-preobrazova>
16. <https://studylib.ru/doc/550376/sbrnik-po-standartnym-situaciyam>
17. <https://www.twirpx.com/files/science/transport/rail/etps/>
18. <https://topuch.ru/dejstviya-lokomotivnoj-brigadi-pri-padenii-davleniya-v-tormozn/index.html>