

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский государственный индустриальный университет»
Администрация Правительства Кузбасса
Администрация г. Новокузнецка
Институт проблем управления им. Трапезникова РАН
Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН
АНО «Научно-образовательный центр «Кузбасс»**

**СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ
(в образовании, науке и производстве)
AS' 2022**

**ТРУДЫ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО–ПРАКТИЧЕСКОЙ
КОНФЕРЕНЦИИ
(с международным участием)**

15-16 декабря 2022 г.

**Новокузнецк
2022**

УДК 658.011.56
С 409

Редакционная коллегия:

д.т.н., проф. В.В. Зимин (ответственный редактор),
д.т.н., проф. С.М. Кулаков, д.т.н., проф. В.Ю. Островляничик,
д.т.н., проф. Л.Д. Павлова, д.т.н., доц. И.А. Рыбенко,
к.т.н., доц. В.И. Кожемяченко (технический редактор).

С 409 Системы автоматизации (в образовании, науке и производстве) AS'2022: труды Всероссийской научно–практической конференции (с международным участием), 15-16 декабря 2022 г. / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Сибирский государственный индустриальный университет ; под общ. ред. В.В. Зимина. – Новокузнецк : Издательский центр СибГИУ, 2022. – 632 с.

ISBN 978-5-7806-0583-6

Труды конференции посвящены научным и практическим вопросам в области современных систем автоматизации и информатизации учебных, исследовательских и производственных процессов. Представлены результаты исследования, разработки и внедрения методического, математического, программного, технического и организационного обеспечения систем автоматизации и информационно-управляющих систем в различных сферах деятельности.

Сборник трудов ориентирован на широкий круг исследователей, научных работников, инженерно-технический персонал предприятий и научно-исследовательских лабораторий, преподавателей вузов, аспирантов и обучающихся по программам бакалавриата и магистратуры.

УДК 658.011.56

© Сибирский государственный
индустриальный университет, 2022

12. Геотехнологические перспективы использования радиационных свойств угля и породы / С. М. Никитенко, Ю. Ф. Патраков, М. С. Никитенко [и др.] // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2021. – № 6. – С. 181-189. – DOI 10.15372/FTPRPI202.
13. Разработка мощных пластов механизированными крепями с регулируемым выпуском угля / В. И. Клишин [и др.]; отв. ред. М. В. Курленя; Российская акад. наук, Сибирское отделение, Ин-т горного дела. – Новосибирск: Наука, 2007. – 134 с. – ISBN 5-02-023171-1.
14. H. Weber Lidar sensor functionality and variants / Sick ag whitepaper. Germany. 2018.
15. Raj, T.; Hashim, F.H.; Huddin, A.B.; Ibrahim, M.F.; Hussain, A. A Survey on LiDAR Scanning Mechanisms. *Electronics* 2020, 9, 741. <https://doi.org/10.3390/electronics9050741>
16. F. Villa Light detection and ranging (LiDAR). Encyclopedia. Web. 22 June, 2021. <https://encyclopedia.pub/entry/11122>

УДК [621.313.333.1+ 621.313.323]:622.23.05

АНАЛИЗ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОДЪЕМНОЙ УСТАНОВКИ, ПОСТРОЕННОГО НА ОСНОВЕ МАШИНЫ ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ

Поползин И.Ю.¹, Маршев Д.А.²

¹ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет»
г. Новокузнецк, Россия, eidoline@yandex.ru

²ООО «НИИ АЭМ СибГИУ»
г. Новокузнецк, Россия

Аннотация. В статье рассматривается один из вариантов модернизации электропривода шахтных и рудничных подъемных установок на основе асинхронного двигателя с фазным ротором – машина двойного питания. Для разработанной авторами схемы электропривода на основе технологических диаграмм подъемной установки проводится анализ режимов работы и делается вывод о необходимости изменения режимов работы преобразователя частоты в цепи ротора для реализации требуемых технологических режимов.

Ключевые слова: подъемная установка, асинхронный двигатель с фазным ротором, машина двойного питания, преобразователь частоты, векторная диаграмма, тахограмма.

Abstract. The article considers one of the options for upgrading the electric drive of mine hoisting installations based on a wound-rotor induction called a doubly-fed motor. An analysis of the operating modes based of technological diagrams of the lifting installation is carried out for the such electric drive circuit developed by the authors. A conclusion about the need to change the operating modes of the frequency converter in the rotor circuit to implement the required technological modes is made.

Keywords: lifting installation, wound-rotor induction motor, doubly-fed induction machine, frequency converter, vector diagram, speed diagram.

В электроприводе шахтных и рудничных подъемных установок до сих пор достаточно широкое применение находит схема на основе асинхронного двигателя с фазным ротором (АДФР) и роторной станцией. Использование этой схемы исторически было продиктовано возможностью регулировать скорость мощных асинхронных подъемных двигателей в большом диапазоне, не уменьшая при этом их перегрузочную способность; кроме того, данная схема обладает относительной простотой по сравнению с другими. Однако в современных условиях такие установки следует признать морально устаревшими, в первую очередь, по причине низкой энергоэффективности – значительная часть (по разным оценкам, до 25-30%) электрической энергии, подведенной к двигателю, бесполезно рассеивается на резисторах роторной станции в виде тепла. Кроме того, регулирование

скорости подъемного двигателя в данной схеме осуществляется с помощью переключения (шунтирования) ступеней роторной станции, что ведет к практически мгновенному изменению тока роторной цепи двигателя в момент переключения. Это приводит к броскам электромагнитного момента АДФР, что вызывает рывки в подъемных канатах (снижая их срок службы и создавая условия для потенциально аварийных ситуаций) и удары в механических передачах (в первую очередь, в редукторе). Кроме того, ступенчатое изменение сопротивления роторной цепи позволяет осуществлять только ступенчатое же регулирование скорости подъема. Таким образом, указанные электроприводы требуют модернизации для соответствия их современным требованиям.

Одним из способов такой модернизации без замены самого подъемного АДФР является его включение по схеме машины двойного питания (МДП) [1], при этом к ротору машины подключается преобразователь частоты с полностью управляемыми вентильными группами, позволяющий подавать в цепь ротора двигателя добавочное напряжение с регулируемой частотой, амплитудой и фазовым сдвигом [2, 3], а для работы на низких скоростях используется преобразователь тока ротора с активной нагрузкой [4]. Такая схема при условии осуществления алгоритма управления, описанного, например, в [5], позволяет осуществлять энергоэффективное регулирование скорости АДФР в диапазоне 30÷40:1 без существенного падения перегрузочной способности машины и с возможностью рекуперации энергии скольжения во внешнюю сеть.

Упрощенная схема преобразователя в роторной цепи МДП приведена на рисунке 1.

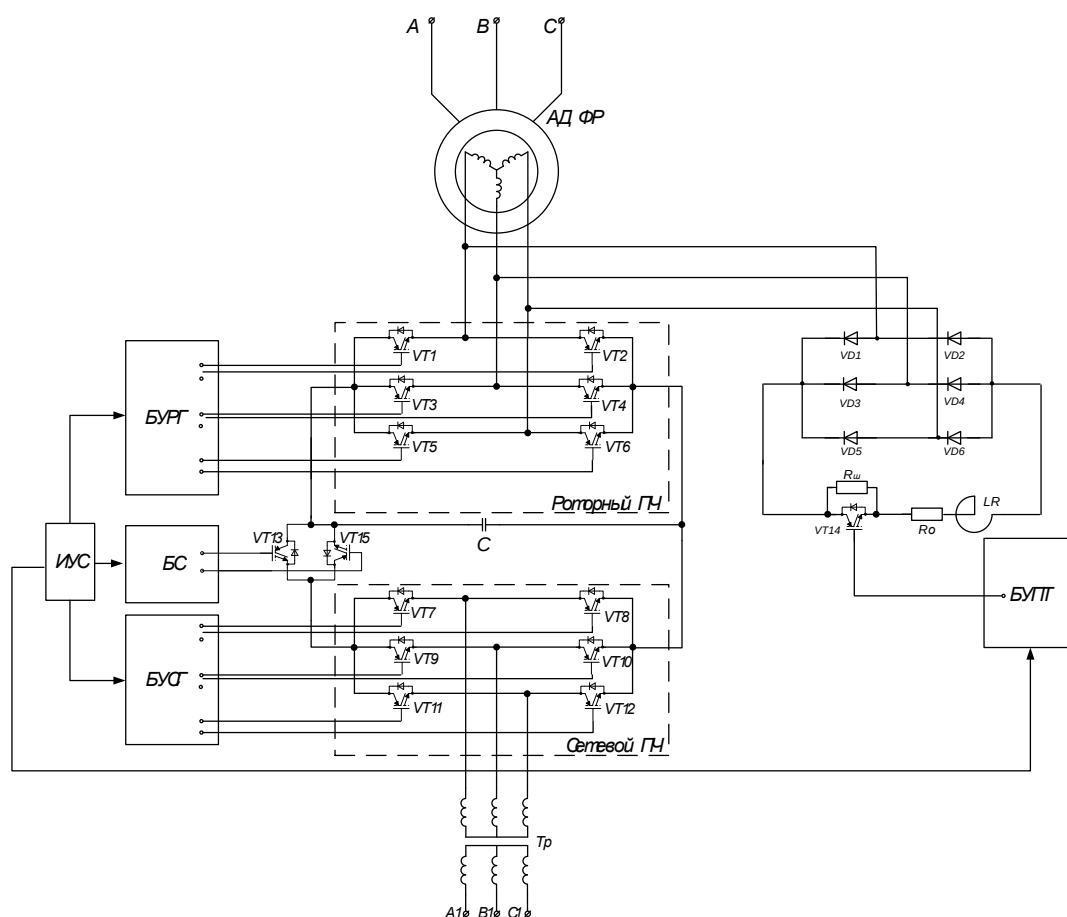
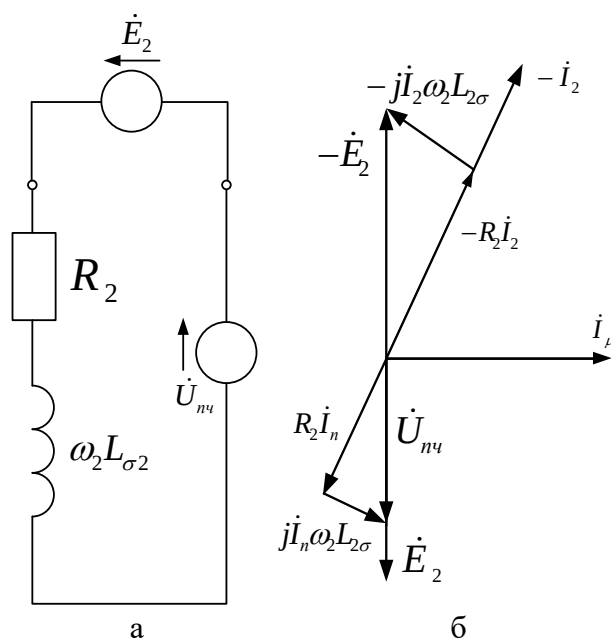


Рисунок 1 – Схема преобразователя в цепи ротора МДП

На рисунке 1 приняты следующие обозначения: VT1-VT15 – силовые ключи (IGBT); А-В-С – сеть, питающая статор; А1-В1-С1 – сеть, питающая преобразователь в

цепи ротора (может быть запитан и от сети А-В-С); С – накопительный конденсатор в цепи постоянного тока; VD1-VD6 – выпрямительные диоды в цепи преобразователя тока; Rш – шунтовое сопротивление; Ro – токоограничивающее сопротивление; LR – сглаживающий реактор; БУРГ – блок управления роторной группой вентилей; БУСГ – блок управления сетевой группой вентилей; БС – блок синхронизации; БУПТ – блок управления преобразователем постоянного тока.

Схема замещения фазы ротора и соответствующая ей векторная диаграмма при включении в цепь ротора преобразователя показаны на рисунке 2.



I_n – ток фазы преобразователя; U_{nc} – напряжение на выходе преобразователя частоты; ω_2 – частота тока ротора; $L_{2\sigma}$ – индуктивность рассеяния ротора, R_2 – активное сопротивление ротора, I_2 – ток ротора

Рисунок 2 – а – схема замещения фазы ротора с преобразователем частоты в цепи; б – векторная диаграмма цепи ротора с источником добавочного напряжения

Момент МДП и ток ротора связаны соотношением [1]:

$$M = \frac{3}{2} L_{\mu} \frac{U_1 I_2 \cos \left[\arctg \frac{s}{s_{KPe}} - \arctg \left(\frac{X_1}{R_1} \right) + \arctg \left(\frac{X_2}{s R_2} \right) \right]}{\sqrt{R_1^2 + X_1^2}}, \quad (1)$$

где M – электромагнитный момент;
 L_{μ} – индуктивность воздушного зазора машины;
 U_1 – напряжение на статоре МДП;
 I_2 – ток цепи ротора МДП;
 s – скольжение;
 s_{KPe} – критическое скольжение;
 X_1, X_2 – соответственно, индуктивные сопротивления цепей статора и ротора;
 R_1, R_2 – соответственно, активные сопротивления цепей статора и ротора.

Выразим из (1) ток ротора:

$$I_2 = \frac{M}{\frac{3}{2} L_\mu \frac{u_s \cos \left[\arctg \frac{s}{s_{KPe}} - \arctg \left(\frac{X_S}{R_S} \right) + \arctg \left(\frac{X_R}{sR_R} \right) \right]}{\sqrt{R_S^2 + X_S^2}}} = \frac{M}{k_M}, \quad (2)$$

где k_M – коэффициент связи между током ротора и электромагнитным моментом.
Уравнение электромеханической характеристики двигателя имеет вид:

$$I_2 = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2}{s} \right)^2 + (X_{1\sigma} + X_{2\sigma})^2}}, \quad (3)$$

где X_1, X_2 – индуктивности статора и ротора соответственно.

В схеме, приведенной на рисунке 1, при условии пренебрежения реактивными сопротивлениями, ток фазы ротора определяется как:

$$I_2 = \frac{E_2 - U_\Pi}{R_2}. \quad (4)$$

При расчете и настройке преобразователя возникает задача определения режимов работы вентиляльных групп и направления тока между ними. Поскольку усилие на валу АДФР определяет величину и направление тока ротора, для анализа режимов работы преобразователя, показанного на рисунке 1, проанализировать режимы работы подъемной и сопоставить их с режимами работы АДФР.

Электропривод подъемной установки (ПУ) должен обеспечивать требуемые по технологии подъема на конкретной установке тахограмму движения подъемного сосуда (сосудов) в стволе и диаграмму моментов (движущих усилий). Конкретный вид тахограммы зависит от технологических особенностей конкретного подъема, а также технических особенностей и конструкции самой установки, однако практика показывает, что наиболее часто как для скиповых, так и для клетевых ПУ применяются трех-, пяти- или семипериодные кусочно-линейные тахограммы [6].

Для определения режимов работы подъемного двигателя обычно осуществляют совместное построение тахограммы, диаграммы ускорений и диаграммы движущих усилий (моментов). Связь основных механических параметров движения при этом выражается основным уравнением движения электропривода:

$$M_{дв} - M_c = J_\Sigma \frac{d\omega}{dt}, \quad (5)$$

где $M_{дв}$ – электромагнитный момент двигателя;

M_c – момент нагрузки на валу двигателя;

J_Σ – приведенный к валу двигателя суммарный момент инерции всех движущихся частей ПУ.

Проанализируем диаграммы работы подъемной машины и соответствующие им режимы работы МДП и частотного преобразователя в роторе/ Как правило, для подъемной установки характерны следующие типовые участки движения с постоянными значениями ускорения [7,8]:

1. выборка напуска каната;

2. растормаживание;
3. разгон и движение на малой скорости в разгрузочных кривых;
4. выход из кривых и разгон до полной скорости подъема;
5. движение на полной скорости;
6. торможение и вход в кривые;
7. движение на малой скорости в кривых;
8. торможение и останов.

Ускорение на участках 1, 3 и 4 положительно. Таким образом, выражение (5) с учетом знака скорости и (2) примет вид:

$$\begin{cases} M_{ДВ} - M_C = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} > 0, \\ \omega > 0, \\ I_2 > 0. \end{cases} \quad (6)$$

В соответствии с (6) выражение для электромеханической характеристики (3) примет вид:

$$I_2 = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2\omega_0}{(\omega - \omega_0)}\right)^2 + (X_{1\sigma} + X_{2\sigma})^2}} \quad (7)$$

С учетом (6) и (7) выражение (4) может быть преобразовано к виду:

$$U_{II} = E_2 - I_2 R_2 \quad (8)$$

Из выражения (8) следует, что на указанных участках тахограммы подъемный двигатель работает в двигательном режиме (I квадрант электромеханической характеристики). При этом ток в звене постоянного тока преобразователя протекает в направлении от роторной группы вентилях к сетевой, изменение U_{II} позволяет регулировать величину тока ротора, а, следовательно, и развиваемого двигателем момента. Векторная диаграмма для данного режима имеет вид, показанный на рисунке 3.

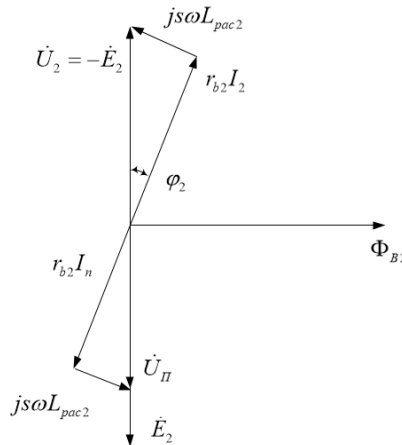


Рисунок 3 – Векторная диаграмма для двигательного режима

Данный режим в целом аналогичен двигательному режиму работы АДФР с изменением активного сопротивления роторной цепи, однако скорость вращения ротора двигателя в данном случае определяется не величиной активного сопротивления цепи ротора, а величиной тока I_n .

Ускорение на участках 6, 8 отрицательно, (5) примет вид:

$$\begin{cases} M_{ДВ} - M_C = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} < 0, \\ \omega > 0, \\ I_2 > 0. \end{cases} \quad (9)$$

С учетом (9) выражение (4) может быть преобразовано к виду:

$$U_{II} = -E_2 + I_2 R_2. \quad (10)$$

Векторная диаграмма, соответствующая данному режиму, приведена на рисунке 4.

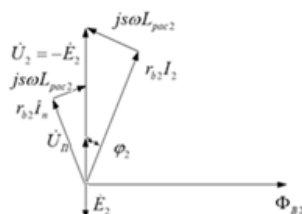


Рисунок 4 – Упрощенная векторная диаграмма АДФР в режиме торможения

В соответствии с (10) на указанных участках двигатель работает в тормозном режиме. В этом случае поток энергии направлен от ротора к сети. При этом, изменяя ЭДС сетевого блока, можно добиться изменения тока ротора и тормозного момента, а также рекуперации энергии [9,10].

На участках 3, 5, 7 ускорение равно 0, выражение (1) примет вид:

$$\begin{cases} M_{ДВ} - M_C = 0, \\ \omega > 0, \\ I_2 > 0. \end{cases} \quad (11)$$

На указанных участках двигатель работает в установившемся двигательном режиме.

Таким образом, совместный анализ технологических режимов работы электропривода и приводного двигателя позволяет установить условия реализации того или иного режима и разработать алгоритм управления.

Библиографический список

1. Ostrovlyanchik V. Y. Algorithmic structure of control system of mine winder electric drive with a doubly-fed motor / V. Yu. Ostrovlyanchik, I. Yu. Popolzin // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – Vol. 377. [012042, 8 p.]. – DOI: 10.1088/1755-1315/377/1/012042.

2. Онищенко Г. Б. Асинхронные вентильные каскады и двигатели двойного питания / Г. Б. Онищенко, И. Л. Локтева. – М.: Энергия, 1979. – 200 с.
3. Хватов С. В. Проектирование и расчет асинхронного вентильного каскада [Текст] / С. В. Хватов, В. Г. Титов. – Горький: ГГУ им. Н. И. Лобачевского, 1977. – 91 с.
4. Управляемый преобразователь тока для электропривода шахтной подъемной установки на основе машины двойного питания / В.Ю. Островляничик, И.Ю. Поползин, Д.А. Маршев, А.В. Толстых, А.В. Дроздова // Горное оборудование и электромеханика. – 2019. – №1. – С.
5. V Yu Ostrovlyanchik et al. Operation algorithm of the hoist electric drive based on a doubly-fed machine with combined control / V Yu Ostrovlyanchik, I Yu Popolzin, V A Kurbarev // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018. –Vol. 206. – Iss.1. – 012040.
6. Долганов А. В. Стационарные машины / А. В. Долганов. – М.: Издательский дом Академии Естествознания, 2017. – 281 с.
7. Шахтный подъем / В. Р. Бежок, В. И. Дворников, И. Г. Манец, В. А. Пристром; под общ. ред. Б. А. Грядущего и В. А. Корсуна. – Донецк : ООО «Юго-Восток ЛТД», 2007. – 624 с.
8. Руководство по ревизии и наладке шахтных подъемных установок / В. Р. Бежок, В. Г. Калинин, В. Д. Коноплянов, Е. М. Курченко; под общ. ред. В. А. Корсуна. – Донецк : Донеччина, 2009. – 672 с.
9. Pena R. Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable-speed wind-energy generation / R. Pena, J. C. Clare, G. M. Asher // IEE Proceedings – Electric Power Applications, 1996. – Vol. 143. – Iss. 3. – P. 231 – 241.
10. Понкратов А. С. Использование машины двойного питания в качестве генератора переменного тока / А. С. Понкратов, Д. Н. Мирошник // Инновационные перспективы Донбасса: материалы международной научно-практической конференции, г. Донецк, 20 – 22 мая 2015 г. Т. 2: Перспективы развития электротехнических, электромеханических и энергосберегающих систем. – 2015. – С. 12 – 21.

СОДЕРЖАНИЕ

ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ

Спирин Н.А., Лавров В.В., Павлов А.В., Гурин И.А., Федотов Г.А.

Интегрированная автоматизированная информационно-моделирующая система анализа и прогнозирования параметров работы комплекса доменных печей 3

Бурков В.Н., Буркова И.В.

Метод сетевого программирования в задачах управления 9

Жилина Н.М., Чеченин Г.И., Херасков В.Ю.

Медицинская демография в сравнении показателей России и Новокузнецка..... 15

Кизилов С.А., Баловнев Е.А., Черкасов П.В., Никитенко М.С., Худогов Д.Ю., Попова Я.В.

Подходы к автоматизированной оценке объема и состава горной массы в процессе выпуска угля на забойный конвейер 20

Поползин И.Ю., Маршев Д.А.

Анализ режимов работы электропривода подъемной установки, построенного на основе машины двойного питания 25

СЕКЦИЯ 1. Системы автоматизации производственного, исследовательского и учебного назначения

Спирин Н.А., Федотов Г.А., Истомин А.С., Щипанов К.А.

Количественные критерии и алгоритмы расчета для оценки диагностики режима работы доменной печи 32

Темнохутов Д.Р., Кулаков С.М.

О формировании оптимальных раскройных планов на участке отделки 25-метровых рельсов..... 37

Трофимов В.Б.

Распознавание состояния доменной плавки на основе нейросетевых технологий 42

Саидмуродов Б.Р., Лавров В.В., Гурин И.А.

Проектирование и программная реализация интеллектуальной системы анализа температуры холодильников системы охлаждения доменной печи 56

Лавров В.В., Гурин И.А., Спирин Н.А.

Применение в образовательной деятельности гибкой методологии разработки программного обеспечения информационных систем..... 61

Сулимова А.А., Симилова А.А., Чичерин И.В.

Программно-аппаратный комплекс автоматизированной системы управления радиальным сгустителем на основе концепции пространства состояний и вейвлет-преобразований при неполной информации о технологических параметрах..... 68

Койнов Р.С., Кулаков С.М., Тараборина Е.Н.

О разработке моделирующего комплекса для исследования эффективности механизмов прецедентного управления 74