

---

**УДК 62-83-52.001.5:621.316**

В.А. ВОРОНИН, старший преподаватель (КузГТУ)  
Ф.С. НЕПША, к.т.н., старший научный сотрудник (КузГТУ)  
г. Кемерово

**РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ  
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ВЫЕМОЧНОГО УЧАСТКА  
УГОЛЬНОЙ ШАХТЫ**

Развитие современной угольной промышленности связано с широким внедрением цифровых технологий в рамках программы «Индустрис-4.0». При этом, как отмечается в статье [1], для рационального внедрения цифровых технологий в процессы угледобычи необходимо развитие подходов к компьютерному имитационному моделированию.

Имитационное компьютерное моделирование является важным инструментом для обоснованного принятия решений по повышению производительности и внедрению новых перспективных технологий. При этом создаваемые имитационные модели должны быть разработаны на низком уровне абстракции и быть максимально детальными, с дальнейшей интеграцией отдельных подсистем угольной шахты в единую систему управления на базе цифровых двойников [2].

Применение имитационного моделирования должно обеспечить разработку эффективных мероприятий по повышению энергоэффективности для снижения удельного расхода электроэнергии на выемку угля при общем повышении энергоэффективности системы электроснабжения (СЭС) угледобывающего предприятия.

Одним из способов повышения энергоэффективности СЭС угольных шахт является компенсация реактивной мощности, позволяющая разгрузить сеть по реактивной мощности, снизить потери электроэнергии и напряжения, уменьшить провалы напряжения при пусках горных машин. Промышленностью освоен выпуск конденсаторных батарей во взрывозащищенном исполнении – УКРВ [3]. УКРВ могут быть установлены под землей вблизи крупных потребителей реактивной мощности, что ставит ряд задач, связанных с разработкой методики оптимального размещения компенсирующих устройств в подземной части СЭС угольной шахты [15].

Устройства компенсации реактивной мощности со ступенчатым регулированием (УКРВ) не имеют достаточного быстродействия для работы в условиях резкого изменения потребления реактивной мощности, вызванного резкопеременным режимом работы горно-шахтного оборудования. В

**V Всероссийская научно-практическая конференция**  
**«ЭНЕРГЕТИКА И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА»**  
**208-2** **16-17 декабря 2020г.**

---

связи с этим, становится актуальным вопрос оценки эффективности использования в СЭС угольных шахт быстродействующих компенсирующих устройств на базе технологии FACTS [14].

В настоящее время на рынке отсутствуют устройства FACTS в рудничном исполнении. Однако имеются исследования и патенты китайских ученых [4-6], подтверждающие возможность использования устройств FACTS типа STATCOM в подземной части угольных шахт.

Для оценки эффективности применения устройств FACTS для компенсации реактивной мощности выемочных участков угольных шахт требуется разработка детальной имитационной модели, которая позволила бы моделировать потребление реактивной мощности электроприводом горных машин в динамических режимах работы.

В настоящее время вопрос разработки подобных моделей недостаточно освещен в литературе. В существующих публикациях представлены имитационные модели:

- пригодные только для моделирования установившихся режимов работы (в данных моделях отсутствует механическая часть горных машин), например, [7, 8];
- пригодные для моделирования динамических режимов работы конкретной горной машины, однако, модель не интегрирована в общую имитационную модель выемочного участка, например, [9, 10].

Также необходимо отметить, что ни в одной из известных работ не ставится задача моделирования режимов потребления реактивной мощности выемочным участком угольной шахты.

Учитывая вышесказанное, требуется проведение научных исследований и разработка имитационной модели выемочного участка угольной шахты, удовлетворяющей следующим требованиям:

- учет механической части горных машин, позволяющей корректно моделировать пусковые процессы и учитывать колебания момента сопротивления электропривода в рабочих режимах, в т.ч. за счет влияния случайных факторов (колебания сопротивляемости разрушающегося массива угля, изменения грузопотока конвейера и т.д.);
- интеграция отдельных моделей горных машин в общую имитационную модель выемочного участка;
- учет типового сценария рабочей смены выемочного участка, определяющего порядок и время пуска и работы отдельных горных машин;
- учет СЭС выемочного участка (моделирование кабельной сети, ПУПП и т.д.).

Основным электрооборудованием выемочного участка является очистной комбайн, скребковый и ленточный конвейеры, перегружатель,

дробилка. Для моделирования механической части горных машин были использованы математические модели, представленные в работах: для очистного комбайна – [10]; для скребкового конвейера – [11, 15]; для ленточного конвейера – [12]. В связи с малой мощностью электропривода перегружателя и дробилки, для данных горных машин не предусмотрено моделирование механической части. Структурная схема имитационной модели приведена на рис. 1. Пример моделирования электропотребления на питающем кабелем РПП 6 кВ при совместной работе очистного комбайна, скребкового и ленточного конвейера показан на рис. 2.

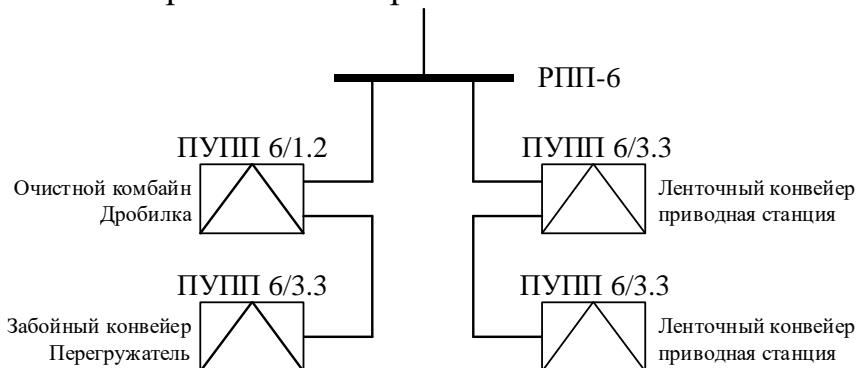


Рис. 1. Структурная схема моделируемой части выемочного участка

Как следует из полученных зависимостей (рис. 2, а), график электропотребления выемочного участка при совместной работе горных машин существенно неравномерный. После пуска горных машин наблюдаются колебания потребляемой мощности, вызванные выравниванием нагрузки между головным и хвостовым электроприводом забойного конвейера и работой очистного комбайна. Наиболее низкий коэффициент мощности (рис. 2, б) наблюдается во время пуска электропривода.

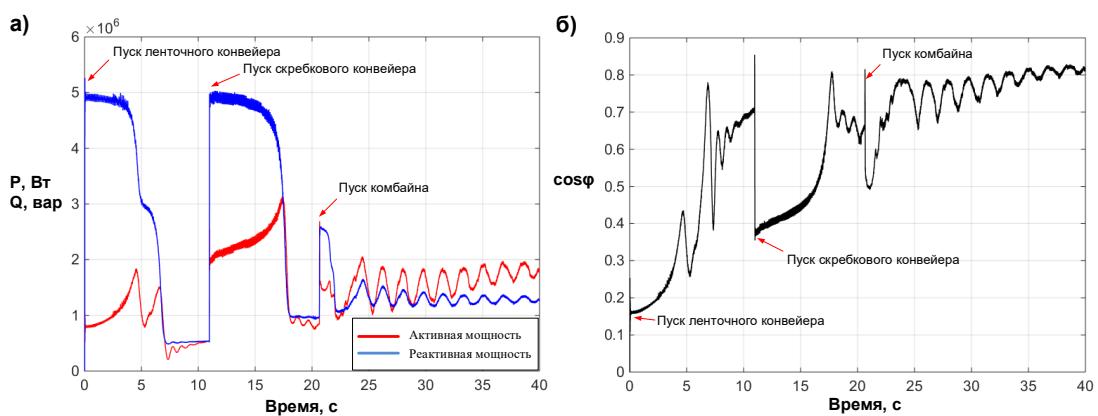


Рис. 2. Результаты моделирования изменения электропотребления (а) и коэффициента мощности (б) выемочного участка во время пуска горных машин

**V Всероссийская научно-практическая конференция  
«ЭНЕРГЕТИКА И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА»  
208-4 16-17 декабря 2020г.**

---

В связи с этим наибольший объем генерируемой компенсирующими устройства реактивной мощности требуется вводить кратковременно (5-10 сек) во время пусковых процессов. В установившемся режиме работы колебания коэффициента мощности менее существенны и компенсация реактивной мощности может осуществляться нерегулируемыми компенсирующими устройствами.

Результаты моделирования могут быть использованы для определения требуемого состава и мощности компенсирующих устройств, модель позволяет оценить взаимодействие компенсирующих устройств с СЭС выемочного участка с целью оценки влияния компенсации реактивной мощности на уровень потерь электроэнергии и изменения напряжения во время переходных процессов.

**Благодарности:** Работа выполнена при поддержке Гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых №МК-236.2020.8 по теме «Исследование и разработка энергоэффективных схем электроснабжения выемочных участков угольных шахт с применением технологий интеллектуального управления потоками электроэнергии и мощности».

**Список литературы:**

1. Плакиткин, Ю.А. Программы «Индустрія-4.0» и «Цифровая экономика российской федерации» – возможности и перспективы в угольной промышленности / Ю.А. Плакиткин, Л.С. Плакиткина // Горная Промышленность. – №1 (137), 2018. – С. 22-28
2. Окольнишников, В.В. Разработка цифрового двойника очистного забоя угольной шахты / В.В. Окольнишников, А.А. Ордин, С.В. Рудометов // Труды XVII Международной конференции DICR-2019, Новосибирск, 3-6 декабря 2019 г. – С. 148-152
3. Установка конденсаторная рудничная взрывозащищенная (УКРВ). Каталог продукции. // Заводы-изготовители горно-шахтного оборудования ЗАО "EXC" [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://oaoeex.ru/upload/docs/ukrv-a-63-500-uh15-specifications.pdf>. – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 28.11.2020)
4. Teng Y., Shi L. Overall Design of Mine Explosion-proof STATCOM Device // Coal Mine Machinery. 2015. vol. 36. no. 03. P. 5-7. doi: 10.13436/j.mkjx.201503003.5. Research and Application of SATCOM Key Technology for Underground Winch Load [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://gb.oversea.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=1019603808.nh&dbcode=CMF\\_D&dbname=CMFDREF](http://gb.oversea.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=1019603808.nh&dbcode=CMF_D&dbname=CMFDREF). – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 13.04.2020)

**V Всероссийская научно-практическая конференция**  
**«ЭНЕРГЕТИКА И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА»**  
**208-5** **16-17 декабря 2020г.**

---

5. Explosion-proof STATCOM reactive compensation device [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://patents.google.com/patent/CN201666163U/en>. – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 13.04.2020).
6. Копылов К.Н. Имитационное моделирование системы электроснабжения выемочного участка угольной шахты / К.Н. Копылов, С.Н. Решетняк, С.С. Кубрин // ГИАБ. 2016. №12. С. 40-50
7. Заголило С.А. Компьютерное моделирование многодвигательной системы электропривода в пакете программ MatLab / С.А. Заголило, А.С. Семёнов, М.Н. Семёнова, И.А. Якушев // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2020. – № 8 (2)
8. Семенов А.С. Особенности математического моделирования систем электроприводов технологических установок горных предприятий / А.С. Семенов, А.Н. Егоров // НТВ «Каротажник». – 2018. – № 11 (293)
9. Ткачев В.В. Использование имитационного моделирования для исследования системы автоматического управления добычным комбайном: монография / В.В. Ткачев, А.В. Бубликов; М-во образования и науки Украины, Нац. горн. ун-т. Д.: НГУ, 2015. – 182 с.
10. Modelling of the transmission system in conveying equipment based on Euler method with application / Rui Nie, Baiyan He, Lianhong Zhang, Guoping Li // Proc IMechE Part K:J Multi-body Dynamics 2014, Vol. 228(3) 294–306 DOI: 10.1177/1464419314534787
11. Тарнецкая, А.В. Энергоэффективный электропривод ленточного конвейера на базе безредукторного синхронного мотор-барабана: дис. ... канд. техн. наук. КузГТУ, Санкт-Петербург, 2020
12. Nepsha, F., Voronin, V., Belyaevsky, R., Efremenko, V., & Varnavskiy, K. (2020). Application of FACTS Devices in Power Supply Systems of Coal Mines. In E3S Web of Conferences (Vol. 174). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017403026>
13. Воронин В.А. Перспективы использования D-STATCOM в угольных шахтах / В.А. Воронин, Ф.С. Непша // Перспективы инновационного развития угольных регионов России [Электронный ресурс]: Сборник трудов VII Международной научно-практической конференции. Прокопьевск: филиал КузГТУ в г. Прокопьевске, 2020. С. 67-72
14. Непша Ф.С. К вопросу оптимального размещения взрывозащищенных устройств компенсации реактивной мощности на угольных шахтах / Ф.С. Непша, В.А. Воронин // VII Международная научно-практическая конференция «Иновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2020» (Санкт-Петербург, 23—24 апреля 2020 г.) – Санкт-Петербург, 2020 – С. 573–577

**V Всероссийская научно-практическая конференция  
«ЭНЕРГЕТИКА И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА»  
208-6 16-17 декабря 2020г.**

---

15. Voronin, V., Nepsha, F. (2020). Modelling and Simulation of Scraper Face Conveyor Electric Drive. In 2020 Ural Smart Energy Conference (USE). Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia.

Информация об авторах:

Воронин Вячеслав Андреевич, старший преподаватель, КузГТУ, 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, д. 28, voroninva@kuzstu.ru

Непша Федор Сергеевич, к.т.н., старший научный сотрудник, КузГТУ, 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, д. 28, nepshafs@kuzstu.ru