

УДК 62-833.6

## Система возбуждения тягового генератора электромеханической трансмиссии карьерного самосвала грузоподъемностью 240 тонн

А.Б. Виноградов, Н.Е. Гнездов  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
г. Иваново, Российская Федерация  
E-mail: vinogradov@drive.ispu.ru, gnezdov@drive.ispu.ru,

### Авторское резюме

**Состояние вопроса:** Основным типом трансмиссии в карьерных самосвалах большой грузоподъемности является электромеханическая трансмиссия переменного тока. Источником электрической энергии, как правило, является синхронный генератор с обмоткой возбуждения. Специфичными требованиями к системе регулирования возбуждения являются: высокое быстродействие, энергоэффективность и согласованная с нагрузкой работа. Производители таких систем не раскрывают решений указанных задач. В связи с этим актуальным является создание системы возбуждения тягового генератора, обеспечивающей регулирование напряжения в звене постоянного тока за время не более 1 секунды с уровнем пульсаций в статике не более 1 % и динамической ошибкой не более 20 % при набросе номинальной мощности тягового двигателя.

**Материалы и методы:** Моделирование системы возбуждения выполнено в среде Delphi. Цифровая система управления реализована на базе микроконтроллера TMS320F2808. Экспериментальные исследования проведены на полномасштабном стенде по утвержденной программе и методике испытаний.

**Результаты:** В результате моделирования и экспериментальных исследований определены структура и параметры системы возбуждения тягового генератора. Для повышения энергоэффективности введена зависимость регулируемого напряжения в звене постоянного тока от нагрузки. Определены параметры регуляторов, обеспечивающие требуемый компромисс между быстродействием и уровнем пульсаций регулируемого напряжения в статике. Минимизация динамических провалов напряжения достигнута регулированием ЭДС при работе генератора на холостом ходу.

**Выводы:** Разработанная система возбуждения тягового генератора обеспечивает энергоэффективное регулирование напряжения в звене постоянного тока с уровнем пульсаций в статике менее 0,5 %, динамической ошибкой 5 % и временем регулирования 0,2 с. Полигонные испытания самосвала с созданной системой запланированы на первую половину 2015 года.

**Ключевые слова:** система возбуждения, тяговый генератор, карьерный самосвал, электромеханическая трансмиссия, тяговый привод, энергоэффективное регулирование напряжения.

## Traction alternator excitation system of the electromechanical transmission of a 240 ton load capacity dump truck

A.B. Vinogradov, N.E. Gnezdov  
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation  
E-mail: vinogradov@drive.ispu.ru, gnezdov@drive.ispu.ru

### Abstract

**Background:** Alternating current electromechanical transmission is the basic transmission type in large capacity dump trucks, with electric power usually generated by a field-coil synchronous generator. The specific requirements for the field control system are: fast response, energy saving and load coordinated operation. However, solutions to these problems are kept secret by the producers of such systems. Therefore, our research objective was to develop a traction alternator excitation system that would ensure voltage control in a dc link with the transient-process time no more than 1 second, the ripple level in static conditions less than 1% and the dynamic error no more than 20% under traction motor nominal power surge.

**Materials and methods:** Simulation of the excitation system is executed in Delphi environment. The digital control system is implemented based on the TMS320F2808 microcontroller. The experiments are conducted on a full-scale workbench according to the approved test program and methods.

**Results:** By modeling and conducting experimental studies we have determined the structure and parameters of the traction alternator excitation system. Energy saving is achieved by introducing a dependence of dc link regulated voltage on the load. We have also identified the regulator parameters which provide the required compromise between the fast response and voltage ripple level in static mode. The voltage dynamic error is minimized by EMF regulation in the alternator idle run mode.

**Conclusions:** The developed traction alternator excitation system provides energy-efficient control of dc link voltage with the ripple level in static mode less than 0,5%, the dynamic error 5% and the transient-process time 0,2 second. Ground tests of a dump truck equipped with the designed system are scheduled for the 1st half of the year 2015.

**Key words:** excitation system, traction alternator, dump truck, electromechanical transmission, traction drive, energy-efficient voltage control.

Применение электромеханической трансмиссии в карьерных самосвалах БелАЗ состоялось в 1968 г., с конца 90-х годов прошлого века начался переход на электромеханические трансмиссии переменного тока [1]. Это открыло новые возможности в повышении ресурса, снижении стоимости эксплуатации и увеличении грузоподъемности [2, 3]. Однако применение электромеханической трансмиссии переменного тока ставит перед разработчиками ряд задач, связанных как с режимами работы транспортного средства, так и с особенностями машин переменного тока [4, 5].

В качестве генератора в тяговом электрооборудовании карьерных самосвалов используется синхронная машина с электромагнитным возбуждением, оснащенная двумя группами 3-фазных обмоток на статоре, питающих два неуправляемых выпрямителя. Регулирование напряжения в звене постоянного тока (ЗПТ) осуществляется по каналу управления током возбуждения генератора [6]. Управление возбуждением синхронного тягового генератора (СТГ) в составе комплекта тягового электрооборудования (КТЭО) самосвала имеет следующие особенности:

- быстрое действие СТГ определяет быстрое действие всего КТЭО, так как возможности векторного управления асинхронными тяговыми приводами левого и правого колес превосходят возможности одноканального управления электромагнитными процессами в СТГ. Ограниченное быстрое действие СТГ необходимо учитывать при согласовании динамических характеристик элементов силового канала КТЭО;

- наличие двух блоков тормозных резисторов (УВТР 1 и 2) для обеспечения тормозных режимов самосвала и относительно небольшая емкость ЗПТ определяют повышенный уровень пульсаций напряжения ЗПТ и различие этих уровней для тяговых и тормозных режимов работы приводов тяговых асинхронных двигателей (ТАД);

- система возбуждения тягового генератора (СВТГ) должна разрабатываться с учетом задач повышения экологичности и экономии топлива, обязательных для всех транспортных средств.

Исходя из этого, цель создания СВТГ можно определить как обеспечение во всех режимах работы самосвала энергоэффективного регулирования напряжения ЗПТ с максимальным быстрым действием при допустимом уровне пульсаций. Отметим, что производители систем возбуждения генераторов для карьерных самосвалов, как отечественные, так и зарубежные, не раскрывают структур, алгоритмов, а иногда даже и технических характеристик своих систем.

Согласно техническому заданию, СВТГ должна обеспечивать следующие режимы работы:

- режим пуска СТГ в составе КТЭО;

- режим автоматического регулирования тока возбуждения при его внешнем задании;

- режим автоматического регулирования напряжения выпрямителя на выходе СТГ (напряжения шины ЗПТ) при его внешнем задании и изменении скорости СТГ в диапазоне 1500–1900 об/мин.

Питание СВТГ должно осуществляться от одной из обмоток СТГ. Значение емкости фильтра звена постоянного тока инвертора – 2х14,4 мФ. Параметры СТГ и технические требования к СВТГ приведены в таблице.

**Технические требования к системе возбуждения и параметры тягового генератора**

№ п/п	Наименование параметра	Значение параметра
1	Мощность на выходе генератора, кВт, не более	1550
2	Мощность тормозной резисторной установки, кВт	2х1200
3	Номинальная мощность на валу асинхронного двигателя, кВт, не более	700
4	Номинальный выходной ток обмотки возбуждения, $I_{вн}$	180 А
5	Диапазон регулирования тока возбуждения	0,1 $I_{вн}$ ... $I_{внmax}$
6	Статическая погрешность регулирования тока возбуждения	не более 1 %
7	Время регулирования тока возбуждения (определяемое как время вхождения в 3 %-й коридор при ступенчатом изменении задания)	не более 0,1 с
8	Перегрузочная способность по току возбуждения, $I_{внmax}/I_{вн}$	1,5 в течение 30 с
9	Номинальное напряжение обмотки возбуждения, $U_{вн}$	43 В
10	Диапазон изменения напряжения обмотки возбуждения	$\pm U_{пит} 1,35 В$
11	Диапазон регулирования выходного напряжения СТГ (выпрямленного), $U_d$	600–1200 В
12	Статическая погрешность регулирования напряжения $U_d$	не более 1 %
13	Динамическая ошибка регулирования напряжения $U_d$ при задании 1000 В и ступенчатом набросе/сбросе мощности активной нагрузки от 0 до 700 кВт	не более 200 В
14	Время регулирования напряжения $U_d$ (определяемое как время вхождения в 3 %-й коридор при ступенчатом изменении задания)	не более 1 с

Силовой преобразователь СВТГ выполнен по схеме: неуправляемый выпрямитель – понижающий DC/DC преобразователь на IGBT-инверторе с ШИМ (рис. 1). Для начального заряда ЗПТ при отсутствии возбуждения предусмотрен блок подпитки. Контроллер СВТГ (КСВТГ) выполнен на базе *DSP TMS320F2808*. В качестве обратных связей использованы сигналы с датчиков тока обмотки возбуждения, фазных напряжений СТГ, напряжения в ЗПТ СВТГ, выходных токов силовых выпрямителей, а также температуры силовых модулей. Для реализации защитных функций также используются сигналы датчиков перегрева обмоток и подшипниковых узлов СТГ.

Питание выпрямителя блока СВТГ первоначально было выполнено от одной из трех-

фазных обмоток генератора. После испытаний в целях снижения нагрузки на силовые ключи СВТГ решено перейти на нулевую схему. В результате напряжение в ЗПТ СВТГ снизилось до 500–900 В в зависимости от нагрузки. Однако при этом встала задача получения информации о напряжении в ЗПТ силовых преобразователей (СП) ТАДов, поскольку оно питалось по прежней схеме, а датчик напряжения располагается в ЗПТ СВТГ.

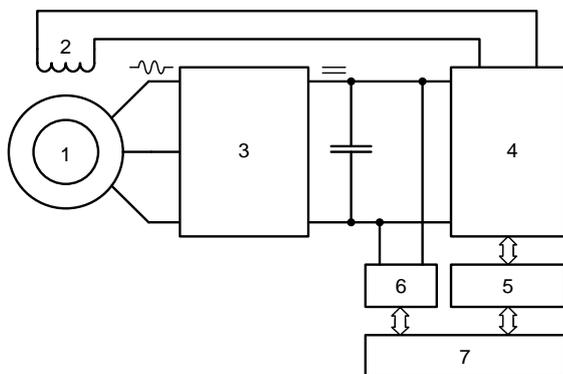


Рис. 1. Функциональная схема системы возбуждения тягового генератора: 1 – СТГ; 2 – обмотка возбуждения; 3 – неуправляемый выпрямитель; 4 – IGBT-инвертор; 5 – драйвер IGBT; 6 – блок подпитки; 7 – контроллер СВТГ

Чтобы избежать конструктивных изменений, обратная связь контура напряжения была организована по каналу CAN. Кроме того, это позволило реализовать дополнительные защиты в СВТГ по состоянию привода ТАД и тормозного резистора (УВТР). Программная проверка достоверности принятой информации обеспечила устойчивую работу контура регулирования напряжения ЗПТ в реальном времени (период расчета контура 1 кГц). В течение полугодия испытаний на разных стендах сбоев в работе СВТГ по причине нарушений связи с приводом правого ТАД зафиксировано не было.

Система управления возбуждением СТГ включает в себя последовательно-подчиненные контуры с ПИ-регуляторами тока возбуждения и напряжения ЗПТ. Для снижения потерь в силовых элементах КТЭО задание напряжения в ЗПТ изменяется в зависимости от потребляемой ТАДами мощности. В целях минимизации динамических провалов напряжения ЗПТ при резком переходе КТЭО из генераторного в двигательный режим внешний контур системы управления СТГ работает либо в режиме регулирования напряжения ЗПТ, либо в режиме регулирования ЭДС.

Моделирование системы возбуждения выполнено в среде Delphi в составе модели самосвала, которая также включает: модели двигателя внутреннего сгорания (ДВС), СТГ с выпрямителями, ЗПТ, ТАД\_Лев и ТАД\_Прав с их системами управления, модель движения самосвала, учитывающую основные факторы движения и модель системы управления движением, осуществляющей согласованное

управление элементами КТЭО и ДВС. Проведено математическое моделирование основных режимов работы самосвала, в том числе режимов включения/выключения, предельных статических и динамических режимов работы электроприводов, работы элементов КТЭО при типовых условиях движения самосвала, включая режимы антибуксования и антиюза.

В результате моделирования установлено, что настройка параметров регуляторов СВТГ отличается от традиционной, при которой внутренний контур имеет быстродействие выше внешнего. Полученные на модели постоянные времени внутреннего контура тока возбуждения и внешнего контура регулирования напряжения ЗПТ имеют значения  $T_{im} = 200$  и  $T_{um} = 40$  мс соответственно. Критерием настройки был компромисс между быстродействием при отработке ступенчатого изменения нагрузки и уровнем пульсаций напряжения ЗПТ в статике.

В ходе моделирования установлено, что при определенных условиях работы 3-х фазный мостовой выпрямитель СТГ может из нормального режима 3-х диодной проводимости (фазные токи СТГ протекают одновременно через 3 диода выпрямителя) переходить в режим 2-х диодной проводимости (токи одновременно протекают только через 2 диода). Последний сопряжен с недопустимо высоким уровнем пульсации токов СТГ и признан аномальным. Указанный переход провоцируется высоким темпом нарастания нагрузки, а его проявление существенно зависит от электромагнитных параметров генератора. Для устранения эффекта 2-х диодной проводимости при моделировании были наложены дополнительные ограничения на темп изменения СТГ. В реальных условиях эффект не проявился и дополнительное ограничение по этому критерию было отменено.

Наладка и испытания СВТГ выполнялись в два этапа. Испытания на «малом» стенде в ОАО «НИПТИЭМ» имели целью пуско-наладку, проверку работоспособности и основных характеристик силового канала и информационных цепей, отладку программного обеспечения КСВТГ. На втором этапе, на стенде в ООО «Русэлпром-СЭЗ», г. Сафоново (рис. 2), осуществлялась пуско-наладка и автономные испытания СВТГ с выходом на номинальные и предельные режимы, отладка и комплексные испытания КТЭО в целом, проверка соответствия его характеристик требованиям технического задания.

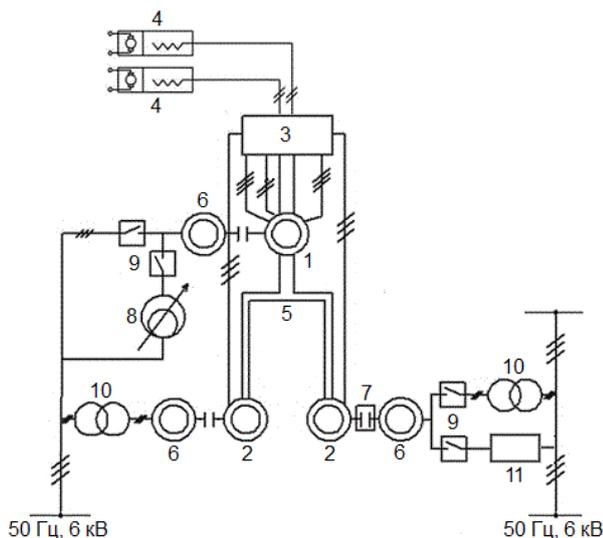


Рис. 2. Структурная схема испытательного стенда: 1 – СТГ; 2 – ТАДы; 3 – шкаф преобразователей и систем управления (ШПСУ); 4 – УВТРы; 5 – воздухопровод системы охлаждения; 6 – гонный и нагрузочные АД; 7 – тензометрическая муфта; 8 – индукционный регулятор; 9 – коммутаторы; 10 – трансформаторы; 11 – преобразователь частоты

Экспериментальное определение параметров обмотки возбуждения СТГ выполнено после настройки каналов измерения. В результате получены характеристика холостого хода (рис. 3), значения активного сопротивления  $R_b = 0,27$  Ом, индуктивности  $L_b$  (рис. 4) и постоянной времени  $T_b = 50$  мс. В связи с применением чопперной схемы с ШИМ для управления обмоткой возбуждения, динамика затухания возбуждения ограничена указанной постоянной времени. С другой стороны, применение чопперной схемы оправдано отсутствием пути возврата в ЗПТ СВТГ энергии, накопленной в обмотке возбуждения, что привело бы к недопустимым перенапряжениям.

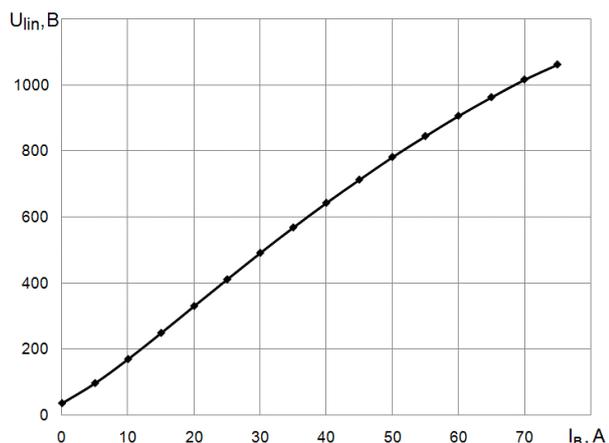


Рис. 3. Зависимость выходной ЭДС от тока возбуждения СТГ

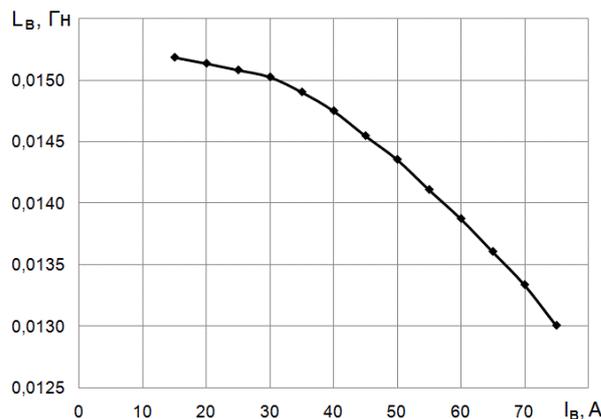


Рис. 4. Зависимость индуктивности обмотки возбуждения от тока возбуждения СТГ

При настройке регуляторов тока возбуждения и напряжения ЗПТ в качестве исходных были взяты значения, полученные на модели (см. выше). В результате варьирования как абсолютных значений, так и соотношений постоянных времени контуров при исследовании переходных процессов по управлению установлено следующее:

- снижение  $Ti$  (ускорение регулятора тока) приводит к росту перерегулирования;
- снижение  $Tu$  (ускорение регулятора напряжения) приводит к росту пульсаций  $U_d$  в статике под нагрузкой, а при значениях меньше 40 мс и к «перевозбуждению», т.е. к превышению среднего  $U_d$  в статике над заданным значением (рис. 5);
- снижение  $Tu$  по отношению к  $Ti$  усиливает «перевозбуждение» в статике и колебательность переходного процесса по управлению;

Исходя из вышесказанного, оптимальной по критериям минимизации перерегулирования и пульсаций  $U_d$  в статике и минимизации времени переходного процесса по управлению представляется настройка на базовые (модельные) параметры  $Ti_m$  и  $Tu_m$  или  $0,5 \cdot Ti_m$  и  $0,5 \cdot Tu_m$ .

Исследования реакции на возмущение выявили следующее:

- снижение  $Tu$  по отношению к  $Ti = 1,0 \cdot Ti_m$  не меняет провала  $U_d$  и перерегулирования при его восстановлении, но увеличивает время переходного процесса за счет замедления снижения  $U_d$  после перерегулирования;
- снижение  $Tu$  по отношению к  $Ti = 0,33 \cdot Ti_m$  практически не меняет провала  $U_d$ , но увеличивает перерегулирование и время переходного процесса по возмущению;
- снижение  $Ti$  по отношению к  $Tu = 1,0 \cdot Tu_m$  снижает провал  $U_d$  и увеличивает перерегулирование при его восстановлении, время переходного процесса практически не меняет (рис. 6).

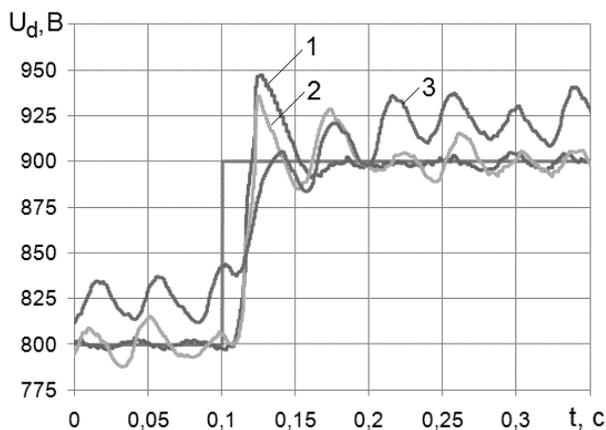


Рис. 5. Переходный процесс по управлению в контуре  $U_d$ : 1 – при  $T_i = 1,0 \cdot T_{i_m}$  и  $T_u = 0,5 \cdot T_{u_m}$ ; 2 –  $T_u = 1,0 \cdot T_{u_m}$ ; 3 –  $T_u = 3,0 \cdot T_{u_m}$

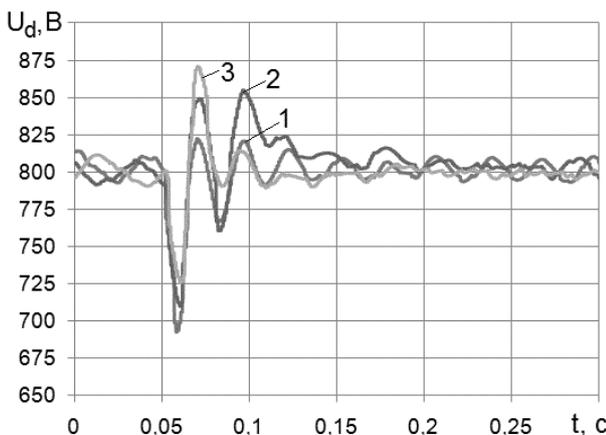


Рис. 6. Переходный процесс по возмущению в контуре  $U_d$ : 1 – при  $T_u = 1,0 \cdot T_{u_m}$  и  $T_i = 0,5 \cdot T_{i_m}$ ; 2 –  $T_i = 1,0 \cdot T_{i_m}$ ; 3 –  $T_i = 3,0 \cdot T_{i_m}$

Исходя из вышесказанного, оптимальной по критериям минимизации провала  $U_d$  без резкого роста перерегулирования и времени переходного процесса по возмущению представляется настройка на  $T_i = 0,33 \cdot T_{i_m}$  и  $T_u = 1,0 \cdot T_{u_m}$  или  $T_i = 0,5 \cdot T_{i_m}$  и  $T_u = 2,0 \cdot T_{u_m}$ . Последнюю и решено было выбрать в качестве окончательной, в абсолютных значениях  $T_i = 100$  мс и  $T_u = 80$  мс. Отличие от модельной настройки связано с конечной точностью измерительных каналов, наличием высших гармонических составляющих в ЭДС генератора и отличием параметров реального объекта от модели.

Снятие статических характеристик СТГ, выполненное на уровнях напряжения 800–1100 В, не только подтвердило работоспособность системы, но и позволило установить зависимости пульсаций регулируемого напряжения от уровня нагрузки (рис. 7). Уровень пульсаций определялся как отношение среднего по модулю отклонения  $U_d$  к среднему  $U_d$  на отрезке 1 с. С учетом этих данных была скорректирована зависимость задания напряжения в ЗПТ от потребляемой ТАДами мощности.

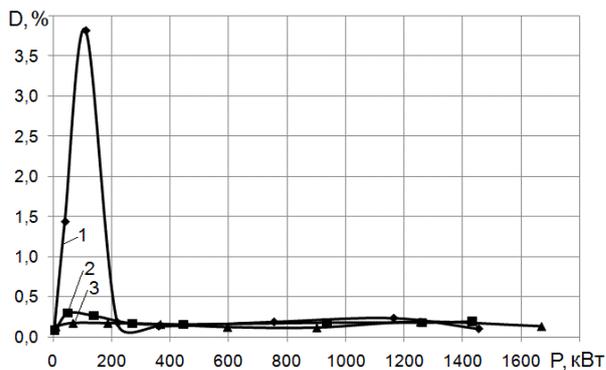


Рис. 7. Зависимость пульсаций напряжения в ЗПТ ТАД от нагрузки СТГ: 1 – при  $U_d = 800$  В; 2 – 900 В; 3 – 1050 В

Динамические характеристики системы определены путем наброса/сброса нагрузки, формируемой с помощью УВТР (рис. 2) в диапазоне от нуля до номинальной (1550 кВт), с разными темпами изменения мощности нагрузки ( $dP/dt$ ). При обработке данных определены зависимости провала напряжения в звене ( $dU$ ) от темпа изменения мощности ( $dP/dt$ ) при набросе нагрузки, а также заброса  $U_d$  от  $dP/dt$  при сбросе нагрузки (рис. 8). Заброс ограничен 50 В благодаря работе УВТР. На основе полученных зависимостей динамика изменения мощности приводов ТАД ограничена на уровне 7000 кВт/с.

Временные диаграммы напряжения ЗПТ ТАД в режиме наброса и сброса номинальной нагрузки СТГ, создаваемой УВТРАми (каждый по 700 кВт за 0,1 с (рис. 9)), показывают, что время отработки ступенчатого наброса/сброса номинальной нагрузки СТГ не превышает 0,2 с с провалом напряжения около 50 В.

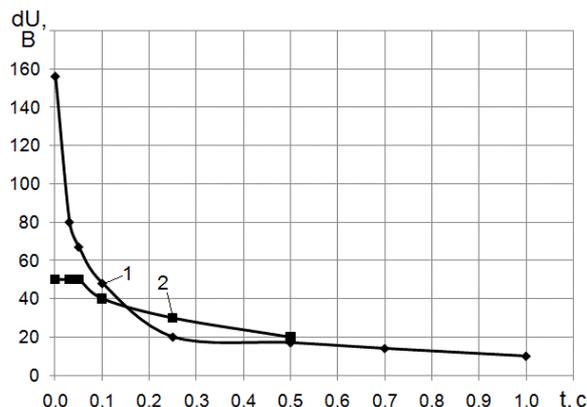


Рис. 8. Зависимость провала (1) и заброса (2) напряжения в ЗПТ ТАД от времени изменения мощности ТАД от 0 до номинальной

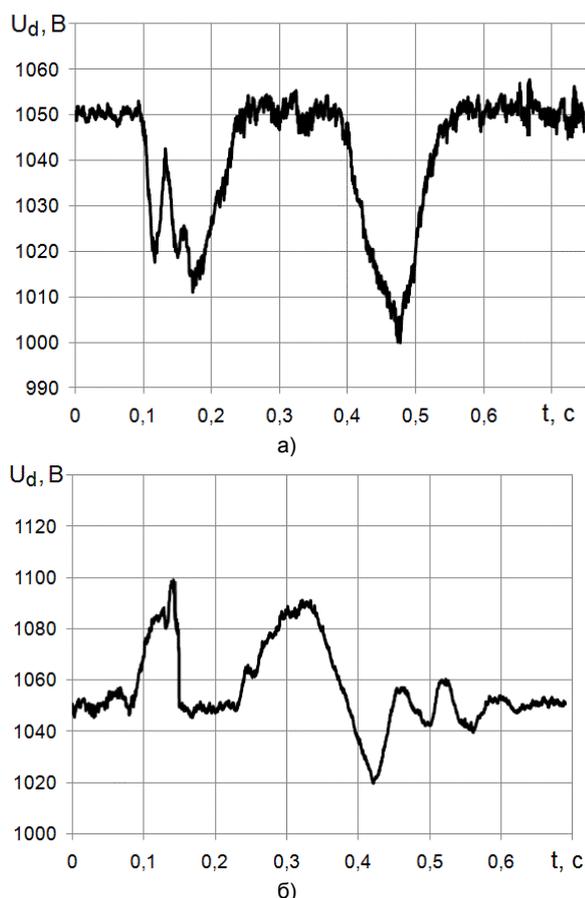


Рис. 9. Временные диаграммы напряжения ЗПТ ТАД при набросе (а) и сбросе (б) номинальной нагрузки

Таким образом, выполнены все технические требования к системе возбуждения СТГ (см. таблицу).

При проверке работоспособности силовой части КТЭО в целом успешно выполнен выход на предельные режимы по скоростям и моментам при одновременной работе СВТГ, силовых преобразователей обоих ТАДов и УВТР. В ходе проверки взаимодействия контроллеров ШПСУ с контроллером верхнего уровня отработаны режимы заряда, штатного и аварийного разрядов, согласованного управления ТАДами во всех режимах движения, а также реакции на аварийные ситуации и ведение рабочих и аварийных журналов.

В результате успешного завершения стендовых испытаний КТЭО БелАЗ-240 было принято решение о его поставке в ОАО «БЕЛАЗ». Полигонные испытания КТЭО в составе самосвала запланированы на первую половину 2015 г. Научные результаты этой работы апробированы на XV Международной научно-технической конференции (МКЭЭЭ-2014, 21–27 сентября 2014 г., Крым, Алушта) и VIII Международной (XIX Всероссийской) кон-

*Виноградов Анатолий Брониславович,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
доктор технических наук, профессор кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок,  
телефон (4932) 26-97-08,  
e-mail: vinogradov@drive.ispu.ru

ференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014 (7–9 октября 2014 г., г. Саранск).

#### Список литературы

1. **Белорусский** автомобильный завод. 1948–2008 / авт.-сост. Т.Б. Сахарчук и др.; под общ. ред. П.Л. Мариева. – Минск: Техналогія, 2008. – 448 с.
2. **Егоров А.Н., Бигель Н.В., Казубенко А.Ф.** Новые разработки ОАО «БЕЛАЗ» – карьерные самосвалы с электромеханической трансмиссией переменного тока грузоподъемностью 90–360 тонн // Горная промышленность. – 2013. – Вып. 1 (107). – С. 19–22.
3. **Гребенщиков А.Н., Пивоваров А.М., Гоголев Г.А.** ОАО «Силовые машины» и ОАО «БЕЛАЗ»: взаимовыгодное сотрудничество // Горный журнал. – 2013. – Вып. 7. – С. 104–107.
4. **Виноградов А.Б., Гнездов Н.Е., Глебов Н.А.** Особенности управления электроприводами транспортных средств с электромеханической трансмиссией // Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». Серия: Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. – 2013. – Вып. 36 (1009). – С. 278–279.
5. **Козярук А.Е., Таранов С.И.** Применение унифицированной системы управления электроприводами самосвала и экскаватора и способы ее диагностики // Вестник ИГЭУ. – 2013. – Вып. 1. – С. 104–108.
6. **Абрамович Б.Н., Круглый А.А.** Возбуждение, регулирование и устойчивость синхронных двигателей. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1983. – 128 с.

#### References

1. Sakharchuk, T.B. *Belorusskiy avtomobil'nyy zavod. 1948–2008* [Belarus automobile plant. 1948–2008]. Minsk, Tekhnologiya, 2008. 448 p.
2. Egorov, A.N., Bigel', N.V., Kazubenko, A.F. *Novye razrabotki ОАО «BELAZ» – kar'ernye samosvaly s elektromekhanicheskoy transmissiyey peremennogo toka gruzopod'emnost'yu 90–360 tonn* [New developments of OJSC «BELAZ» – 90–360 ton load capacity electromechanical transmission dump trucks]. *Gornaya promyshlennost'*, 2013, issue 1 (107), pp. 19–22.
3. Grebeshchikov, A.N. Pivovarov, A.M., Gogolev, G.A. *ОАО «Silovye mashiny» i ОАО «BELAZ»: vzaimovygodnoe sotrudnichestvo* [Power Machines OJSC and OJSC «BELAZ»: mutually beneficial cooperation]. *Gornyy zhurnal*, 2013, issue 7, pp. 104–107.
4. Vinogradov, A.B., Gnezdov, N.E., Glebov, N.A. *Osobennosti upravleniya elektroprivodami transportnykh sredstv s elektromekhanicheskoy transmissiyey* [Electric drive control in vehicles with electromechanical transmission]. *Vestnik Natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta «Khar'kovskiy politekhnicheskii institut», section: Problemy avtomatizirovannogo elektroprivoda. Teoriya i praktika* [Problems of automated electric drives. Theory and practice], 2013, issue 36 (1009), pp. 278–279.
5. Kozyaruk, A.E., Taranov, S.I. *Primenenie unifikirovannoy sistemy upravleniya elektroprivodami samosvala i ekskavatora i sposoby ee diagnostiki* [Application of Unified Control System of Dump Truck and Excavator Electric Drive and Its Diagnostics Methods]. *Vestnik IGEU*, 2013, issue 1, pp. 104–108.
6. Abramovich, B.N., Kruglyy, A.A. *Vozbuzhdenie, regulirovaniye i ustoychivost' sinkhronnykh dvigateley* [Excitation, control and stability of synchronous motors]. Leningrad, Energoatomizdat. Leningradskoe otdeleniye, 1983. 128 p.

*Гнездов Николай Евгеньевич*,  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
кандидат технических наук, доцент кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок,  
телефон (4932) 26-97-08,  
e-mail: gnezdov@drive.ispu.ru