

# Исследование качества электроэнергии на высоковольтном вводе канатно-скребкового экскаватора традиционной конструкции с прямым питанием от сети переменного тока

Pankaj Pandit, член IEEE, Joy Mazumdar, старший член IEEE,  
Thomas May и Walter G. Koellner, член IEEE

**Аннотация:** В горнодобывающей промышленности широко используются экскаваторы различных типов (ковшовые, скребковые и т.п.) для удаления покрывающей породы во время разработки полезных ископаемых. Такие механизмы отличаются характерным рабочим циклом, состоящим из фазы с потреблением энергии и фазы рекуперации энергии. При этом пиковая потребляемая мощность составляет до 1.6 средней величины. "Экскаваторные" нагрузки приводят к флуктуациям напряжения, проблемам с гармониками и коэффициентом мощности на питающей подстанции. В данной статье приведены многообещающие результаты, полученные при использовании новой системы электропривода для скребковых экскаваторов от фирмы Siemens. Благодаря использованию ШИМ с разнесением по фазе, а также режиму с опережающим коэффициентом мощности обеспечивается компенсация гармоник и подавление флуктуаций напряжения в сети. Приведенные результаты получены на реальном экскаваторе, выпускаемом в настоящее время.

**Ключевые слова:** активный выпрямитель, канатно-скребковые экскаваторы, гармоники, коэффициент мощности.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Экскаваторы используются для разработки открытых месторождений полезных ископаемых и обычно подразделяются на ковшовые, роторные и канатно-скребковые. Выбор конкретного типа экскаватора определяется особенностями поверхности, формой карьера, видом и толщиной покрывающей породы, требованиями технологии, соображениями рекультивации земель и т.д.

Компания Siemens Industry Inc. поставляет преобразователи с активным выпрямителем, предназначенные для канатно-скребковых экскаваторов. Активный выпрямитель отличается от обычного тем, что его вентили имеют способность к активному запиранию. Это позволяет переключать их с высокой частотой и управлять потоком мощности, поступающей из сети в звено постоянного тока (ЗПТ). Напряжение ЗПТ подается на группу IGBT-инверторов, управляющих подъемом ковша и его движением «к себе», а также передвижением самого экскаватора. В настоящее время в эксплуатации находятся скребковые экскаваторы с пиковой мощностью до 24 МВт.

Основным требованием к электроприводам переменного тока для подобных применений является выполнение стандартов, касающихся коэффициента мощности, эмиссии гармоник и помех типа флуктуаций напряжения в энергосистему. Несмотря на то, что практически во всех общепромышленных электроприводах вместо применявшейся некогда системы генератор-двигатель давно используются статические преобразователи, в крупных экскаваторах по-прежнему используется схема, которой уже

порядка 100 лет. В этой схеме используется от одного до четырех синхронных двигателей, каждый из которых приводит в движение от четырех до шести генераторов, работающих на постоянной скорости. Генераторы выдают постоянное напряжение с регулируемой величиной, которое подается на группу двигателей постоянного тока. Скорость указанных двигателей регулируется путем изменения напряжения и тока возбуждения. Завышение установленной мощности синхронных двигателей и их перевозбуждение приводят к «емкостному» (с опережающим током) режиму работы энергосистемы. В данной работе рассматриваются результаты применения новой системы электропривода для скребковых экскаваторов от Siemens [1], [2].

## II. АРХИТЕКТУРА СИСТЕМЫ

Экскаватор традиционной конструкции, рассматриваемый в данной работе, питается от сети переменного тока с напряжением 22 кВ. Питающий кабель заводится внутрь корпуса экскаватора. На рис.1 показана функциональная схема электрооборудования экскаватора. Входное напряжение подается на два трансформатора собственных нужд (АРТ1 и АРТ2) и четыре силовых трансформатора (DPT 1—4) через вакуумные выключатели (VCB 1-9).

АРТ 1 и АРТ 2 – трансформаторы мощностью 1500 кВА с обмотками на напряжения 22 кВ и 435 В. Указанные трансформаторы используются для питания вентиляторов, насосов системы охлаждения и т.п. Каждый трансформатор DPT имеет мощность 6 МВА и обмотки на напряжения 22 кВ и 900 В. При этом первичная обмотка соединена в звезду, а две вторичные - в треугольник.

Каждая из шин постоянного тока питается от четырех активных выпрямителей. Каждый активный выпрямитель питается от отдельной вторичной обмотки с напряжением 900 В. Всего система содержит 30 активных выпрямителей, питающих 8 индивидуальных шин постоянного тока. При рекуперативном торможении активные выпрямители работают в инверторном режиме, отдавая энергию в сеть при поддержании заданного коэффициента мощности. Перемещение ковша во время забора породы и подъем ковша обеспечивается семью двигателями по 1650 л.с. Для управления перемещением стрелы используются восемь двигателей по 1250 л.с. Еще четыре двигателя по 1150 л.с. используются в качестве ходовых. Каждая шина постоянного тока рассчитана на питание одного двигателя от каждой степени свободы (продольное перемещение ковша, подъем ковша и перемещение стрелы). При движении самого экскаватора для питания ходовых двигателей используются инверторы, относящиеся к продольному перемещению ковша.

## III. КОНФИГУРАЦИЯ АКТИВНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ И ПРОБЛЕМА КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Каждый активный выпрямитель (АВ) подключен ко вторичной обмотке DPT через трехфазный реактор. Напряжение на шине постоянного тока поддерживается на уровне, превышающем амплитудное значение для вторичной обмотки DPT. Это сделано для исключения возможности насыщения регуляторов с ШИМ из-за недостаточного напряжения в ЗПТ, что привело бы к появлению гармоник со стороны сети.

Рукопись получена 1 июня 2009 г., рассмотрена 3 июня и 28 ноября 2009 г.; подписана в печать 7 января 2010. Дата публикации – 26 июля 2010; дата текущей версии 17 сентября 2010 г. Статья 2009-MIC-103.R2 представлена на ежегодном съезде Общества по промышленным приложениям, проходившем в Хьюстоне 4-8 октября 2009 г., и одобрена для печати в ТЕЗИСАХ IEEE ПО ПРОМЫШЛЕННЫМ ПРИМЕНЕНИЯМ Комитетом по горнодобывающей промышленности Общества.

Авторы работают в Департаменте промышленных систем Siemens Industry, Inc., Alpharetta, GA 30005 США (e-mail: pandit.pankaj@siemens.com; joy.mazumdar@siemens.com; thomas.may@siemens.com; walter.koellner@siemens.com).

Цветные версии одного или более рисунков из настоящей статьи доступны по адресу <http://ieeexplore.ieee.org>.

Цифровой идентификатор объекта 10.1109/TIA.2010.2057470

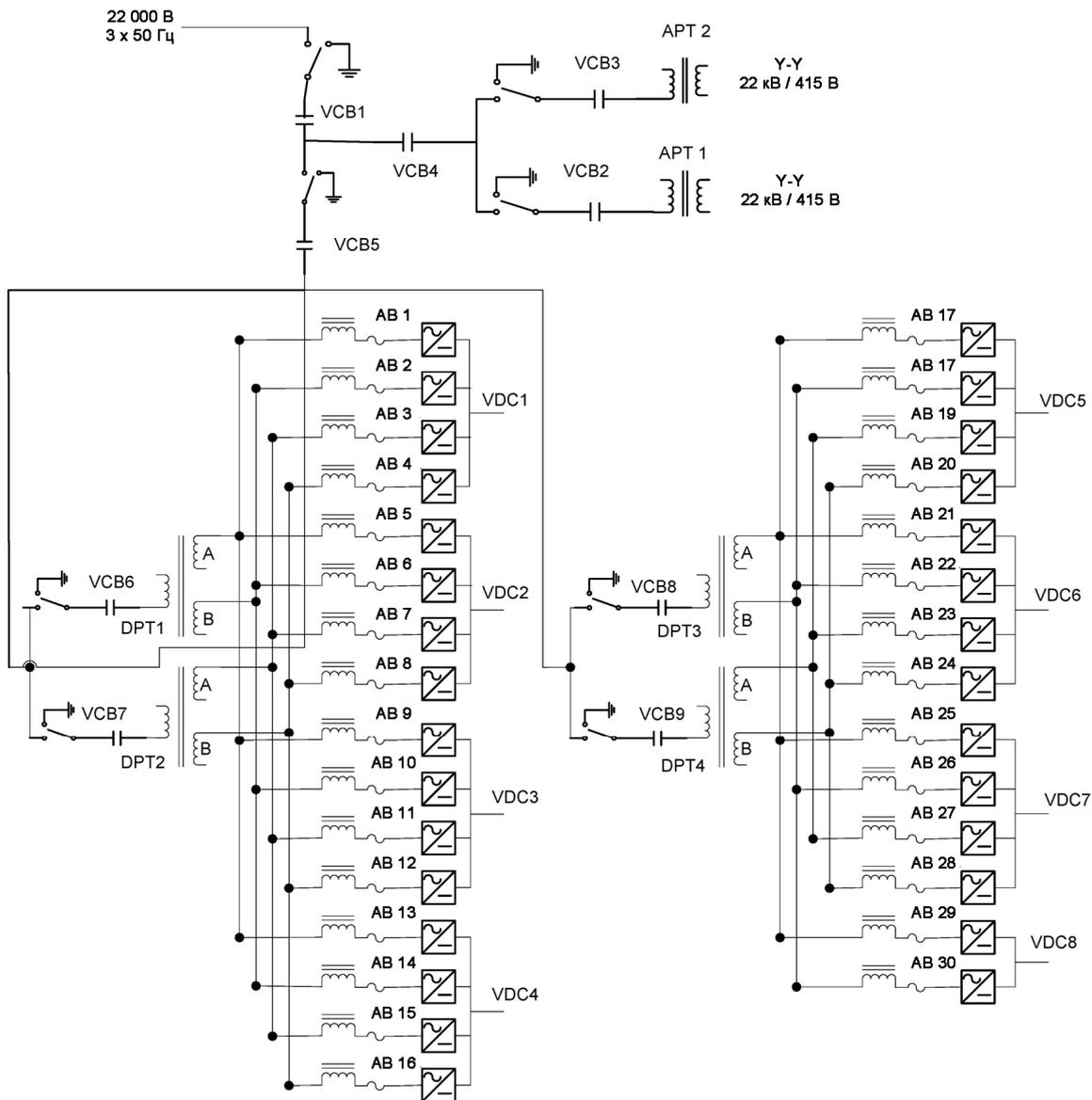


Рис. 1. Распределение поступающей электроэнергии

Последовательные реакторы и реактивное сопротивление вторичных обмоток DPT также выбраны исходя из этого условия. Напряжение на шинах постоянного тока поддерживается на уровне 1800 В.

На рис. 2 показана однофазная эквивалентная схема для одного активного выпрямителя и соответствующая векторная диаграмма. Здесь  $E_S$  – напряжение на вторичной обмотке DPT,  $L$  – индуктивность линии,  $V$  – формируемое с помощью ШИМ напряжение на входе активного выпрямителя и  $\omega$  – угловая частота напряжения в линии. Угол между напряжением на линии (между вторичной обмоткой DPT и активным выпрямителем, – прим. перев.) и напряжением, формируемым с помощью ШИМ, обозначен как  $\delta$ .

Из векторной диаграммы можно записать выражения для активной ( $P$ ) и реактивной ( $Q$ ) мощности в установившемся режиме:

$$P = 3 \cdot E_S \frac{V \sin \delta}{\omega L} \quad (1)$$

$$Q = 3 \cdot E_S \frac{V \sin \delta - E_S}{\omega L} \quad (2)$$

Таким образом, основная цель управления активным выпрямителем заключается в независимом управлении реактивной мощностью при передаче в нагрузку активной мощности, постоянно изменяющейся при работе экскаватора.

#### A. Управление реактивной мощностью

Система электропривода была настроена на работу с опережающим коэффициентом мощности равным 0.96 на силовом вводе в процессе копания, и равным единице при рекуперации энергии.

Для достижения желаемого коэффициента мощности система привода также должна компенсировать индуктивное потребление от нагрузок собственных нужд. Проведенные измерения показали, что трансформаторы собственных нужд потребляли приблизительно 1 МВт активной мощности и 0.67 Мвар реактивной (индуктивной) мощности. Это было учтено при управлении активными выпрямителями в виде сигнала коррекции.

На рис. 3 показана кривая Вар-Вт для активных выпрямителей с учетом коррекции. Каждый из выпрямителей контролирует потребляемую нагрузкой мощность и формирует задание компенсирующей реактивной мощности исходя из кривой с рис. 3.

#### B. Разнесение фаз ШИМ для снижения уровня гармоник

Активные выпрямители работают с фиксированной несущей частотой ШИМ, составляющей 750 Гц. Одновременная коммутация ключей во всех выпрямителях привела бы к появлению в общем токе нежелательных гармоник.

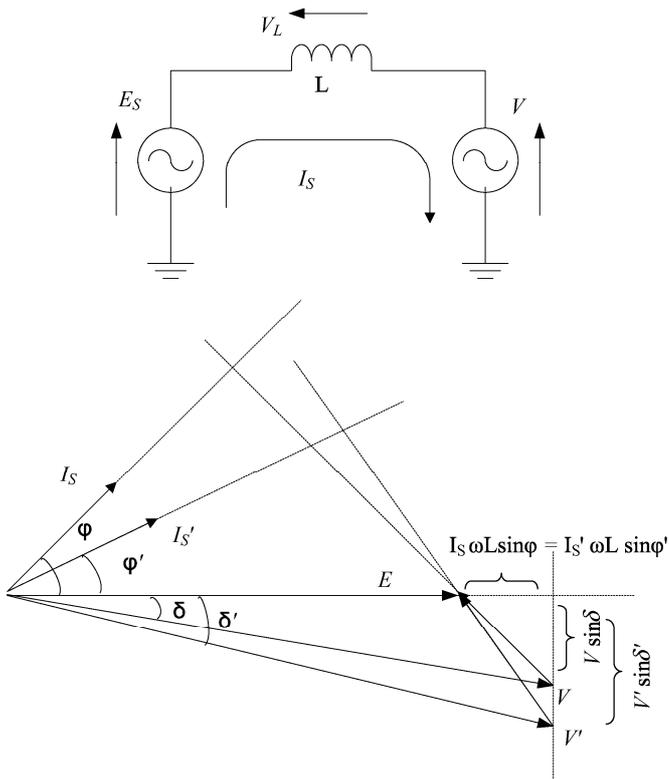


Рис. 2. Эквивалентная схема цепи активного выпрямителя и векторная диаграмма токов в линии

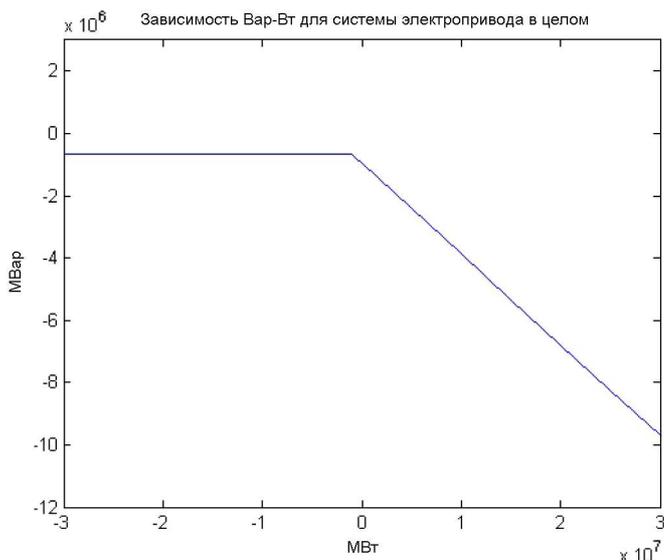


Рис. 3. Кривая Вар-Вт для активных выпрямителей

Для борьбы с этим явлением необходимо исключить «одновременность» пульсаций, создаваемых активными выпрямителями. С этой целью все несущие ШИМ выпрямителей разнесены на определенный угол. Благодаря этому генерируемые гармоники сместились в сторону более высоких частот, а также снизился коэффициент гармонических искажений (THD) в токах со стороны первичных обмоток трансформаторов.

### C. Line-Side Fluctuations

Активный выпрямитель можно рассматривать как регулируемый источник напряжения, питающий звено постоянного тока. Напряжение в звене поддерживается постоянным и практически не зависит от напряжения в сети (в том числе и при рекуперации энергии). При этом важно, чтобы минимальное значение напряжения ЗПТ составляло не менее 1.53

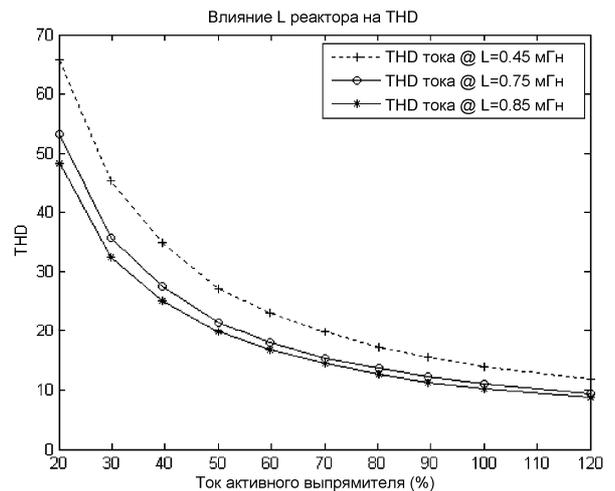


Рис. 4. THD для токов реактора активного выпрямителя

действующего значения напряжения со стороны сети. При выполнении этого условия исключается протекание тока через обратные диоды IGBT-модулей и влияние этого тока на процессы в сети.

Управление вектором тока, потребляемого из сети или отдаваемого в сеть, имеет меньший приоритет, чем поддержание напряжения в ЗПТ. При этом указанный ток практически синусоидален, что сводит к минимуму вносимые в энергосистему возмущения. Использование векторного управления позволяет регулировать коэффициент мощности (и компенсировать реактивную мощность), однако приоритет имеет поддержание необходимого тока в нагрузке.

### D. Влияние реакторов на входе выпрямителей на THD

Реакторы на входе выпрямителей позволяют поднять напряжение вторичной обмотки трансформатора до необходимого в ЗПТ уровня. Кроме того, реактор ограничивает величину гармоник в токе выпрямителя. На рис.4 приведены результаты моделирования влияния индуктивности реактора на THD в токе выпрямителя.

Кроме того, способность активного выпрямителя компенсировать реактивную мощность зависит от максимальной глубины ШИМ. Последняя в свою очередь зависит от напряжения в ЗПТ и напряжения на вторичной обмотке трансформатора. Для системы электропривода, работающей с опережающим  $\cos \phi = 0.8$ , напряжение в ЗПТ было фиксировано на уровне 1800 В при 900 В на вторичной обмотке трансформатора. Индуктивность реактора должна быть достаточной для получения такого напряжения в ЗПТ, и, соответственно, требуемого диапазона глубин модуляции.

Еще одним важным фактором при выборе реактора является его способность ограничивать ток короткого замыкания в течение времени отключения электропривода от сети. Для реактора была выбрана индуктивность 0.75 мГн - минимальное значение при котором обеспечивается подъем напряжения до 1800 В, приемлемое ограничение тока к.з. и фильтрующее действие по отношению к высшим гармоникам.

### IV. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализатор качества электроэнергии Fluke 435 [3] был подключен к выводам вторичных обмоток силового трансформатора и трансформаторов тока (ТТ). Кроме того, для анализа гармоник в фазных токах с высокой частотой квантования использовался осциллограф Tektronix TPS2014. Полученные данные сохранялись в формате CSV для анализа в среде MATLAB.

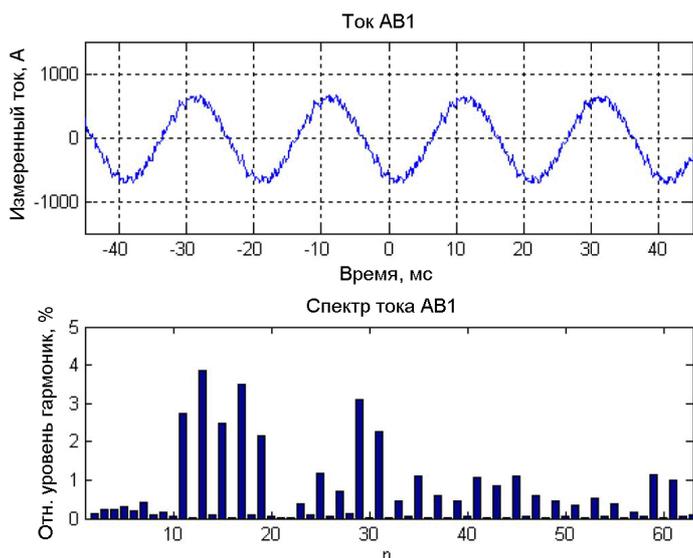


Рис. 5. Ток и его спектр для АВ1

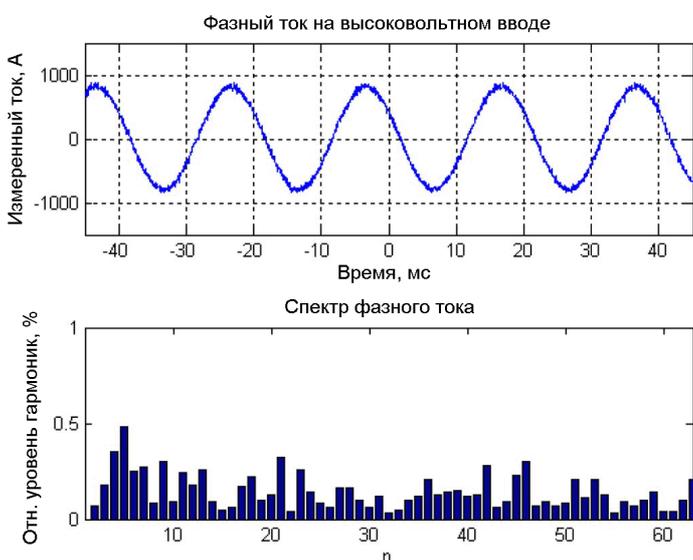


Рис. 6. Ток на высоковольтном вводе и его спектр

Для измерения токов на высоковольтном вводе использовались трансформаторы тока с передаточным отношением 1200:1. Для измерения напряжения в линии 22 кВ использовался потенциальный трансформатор с передаточным отношением 2400:120. Период квантования осциллографа была задан на уровне 40 мкс. Ток активного выпрямителя АВ1 измерялся на вводе в шкаф электропривода. Ток питающей линии измерялся на высоковольтном вводе VCB 1, как показано на рис.1.

На рис. 5 показан ток АВ1 и его спектр. На рис.6 показан ток линии на высоковольтном вводе и его спектр. Оба измерения проводились при максимальной (за рабочий цикл) нагрузке экскаватора.

В таблице 1 приведены амплитуды гармоник, не кратных трем, присутствующих в токе АВ1 и в токе питающей сети.

Уровни типичных гармоник низкого порядка (5-й, 7-й, 11-й и 13-й) не превышают 0.5%.

Таблица 1.

СПЕКТР ТОКОВ АКТИВНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ И ПИТАЮЩЕЙ СЕТИ ПРИ ПОЛНОЙ НАГРУЗКЕ

Порядок гармоники	Ток АВ1 (%)	Ток сети (%)	Порядок гармоники	Ток АВ1 (%)	Ток сети (%)
1	100	100	35	1.11	0.12
5	0.32	0.48	37	0.60	0.13
7	0.40	0.27	41	1.06	0.13
11	2.72	0.24	43	0.85	0.06
13	3.87	0.26	47	0.60	0.07
17	3.51	0.17	49	0.47	0.07
19	2.14	0.10	53	0.54	0.21
23	0.38	0.26	55	0.39	0.03
29	3.09	0.10	59	1.14	0.14
31	2.26	0.12	61	1.00	0.04

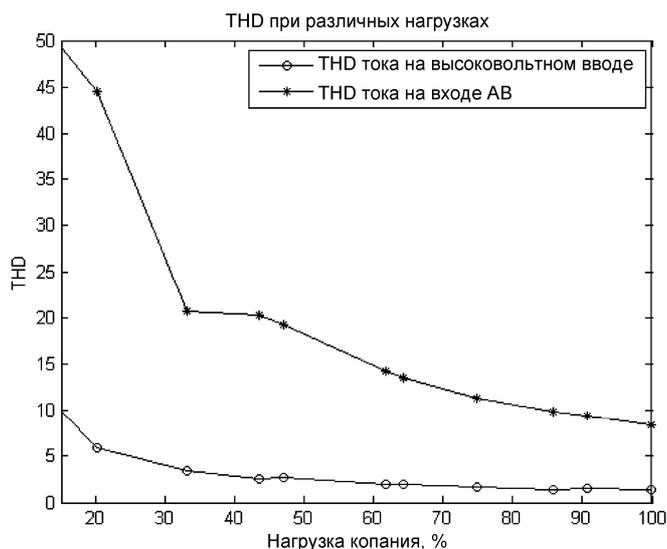


Рис. 7. THD при различных нагрузках

Ниже приведены измеренные значения токов и соответствующие им THD:

$$\text{Макс. ток активного выпрямителя (действующее значение)} = 454.4 \text{ А} \quad (3)$$

$$\text{THD для тока активного выпрямителя при полной нагрузке} = 8.44\% \quad (4)$$

$$\text{Макс. ток на высоковольтном вводе (действующее значение)} = 570.1 \text{ А} \quad (5)$$

$$\text{THD для тока на высоковольтном вводе} = 1.35\% \quad (6)$$

Это подтверждает положительный эффект от разнесения несущих ШИМ по фазе. Значения THD на высоковольтном вводе оказываются значительно меньше предельных значений, устанавливаемых стандартом IEEE 519 [4].

При типичном рабочем цикле экскаватора производилось измерение THD для тока на высоковольтном вводе во всем диапазоне нагрузок (от 10 до 100%). На рис. 7 показаны THD, снятые на высоковольтном вводе и на входе активного выпрямителя при различных нагрузках. Значительное улучшение THD (на высоковольтном вводе. – прим.перев.) доказывает полезность разнесения несущих ШИМ по фазе.

Еще одним важным вопросом является выполнение требований в части контроля реактивной мощности. Соответственно была проведена серия измерений с целью проверки качества управления реактивной мощностью в различных режимах работы экскаватора. Система управления активных выпрямителей отслеживает величину активной мощности, потребляемой двигателями, и формирует задание активной мощности таким образом, что обеспечивается поддержание требуемого коэффициента мощности на высоковольтном вводе экскаватора.

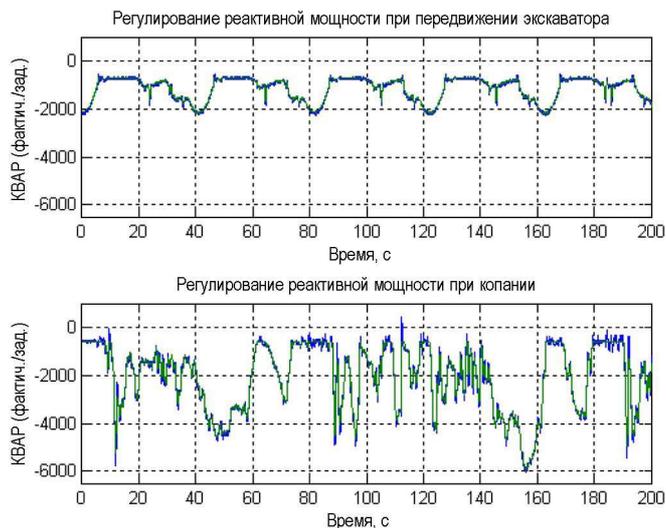


Рис. 8. Управление реактивной мощностью при передвижении экскаватора и в процессе работы

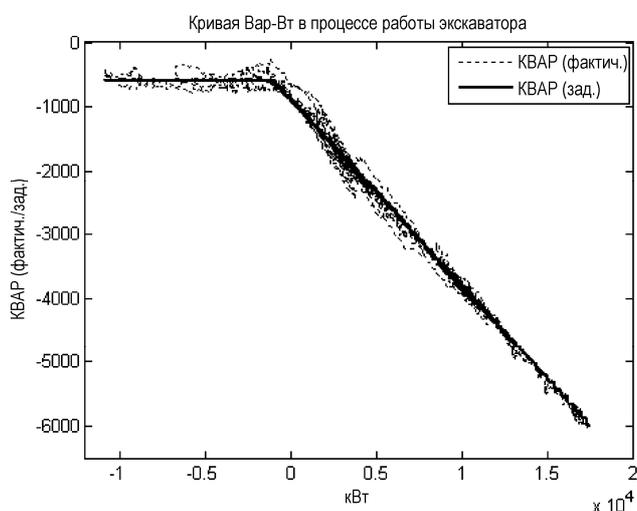


Рис. 9. Кривая Вар-Вт (задание и фактическое значение) в процессе работы экскаватора

На рис. 8 показано задание реактивной мощности и ее фактическое значение при передвижении экскаватора и в процессе копания. Во время передвижения экскаватора измеренная кривая реактивной мощности практически повторяет форму кривой задания. Аналогичный результат получается и в процессе копания, несмотря на резкие изменения нагрузки двигателей.

$$\text{Пиковая реактивная мощность при передвижении экскаватора} = 2 \text{ МВА} \quad (7)$$

$$\text{Пиковая реактивная мощность во время копания} = 6 \text{ МВА} \quad (8)$$

На рис. 9 показана зависимость реактивной мощности привода (в кВар) и реактивной мощности задания для активного выпрямителя от измеренной активной мощности (в кВт). Данные, по которым построены графики на рис. 9, были получены за несколько рабочих циклов экскаватора.

Перед вводом экскаватора в эксплуатацию очень важно выполнить изучение состояния энергосистемы. Исходя из ее конфигурации, коэффициент мощности экскаватора выбирается таким образом, чтобы обеспечивалось максимальное снижение флуктуаций напряжения на высоковольтном вводе экскаватора и в точке общей связи<sup>1</sup> (РСС).

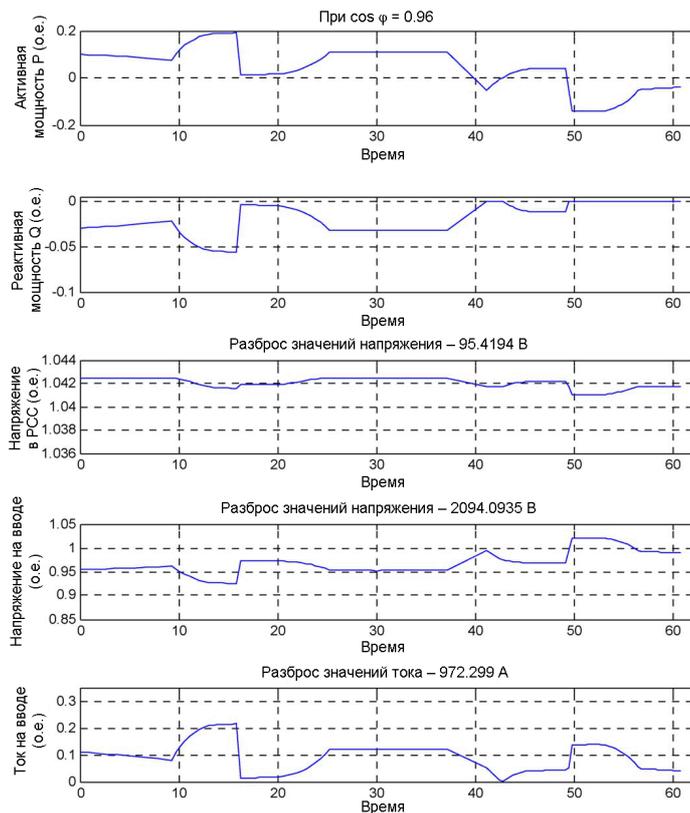


Рис. 10. Поведение энергосистемы при работе экскаватора с опережающим коэффициентом мощности, равным 0.96

На рис. 10 и 11 иллюстрируется влияние задания коэффициента мощности экскаватора. При коэффициенте мощности, заданном на уровне 0.96, флуктуации напряжения в точке общей связи (РСС) минимальны. При снижении коэффициента мощности до 0.93 флуктуации в РСС увеличиваются, несмотря на повышение стабильности напряжения на высоковольтном вводе экскаватора. Оптимальной настройкой системы является такая настройка, при которой флуктуации как на высоковольтном вводе, так и в РСС лежат в допустимых пределах.

Кроме того, были проведены измерения для оценки влияния управления реактивной мощностью и скачков нагрузки при копании на напряжение в линии. Соответствующие осциллограммы показаны на рис. 12.

Как можно видеть из рис. 12, экскаватор работает в режиме знакопеременной мощности, т.е. потребление активной мощности сменяется рекуперацией энергии в сеть. При этом кривая реактивной мощности повторяет кривую задания, и коэффициент мощности на высоковольтном вводе поддерживается на уровне 0.96 при потреблении активной мощности и равным единице при рекуперации. Колебания линейного напряжения при работе экскаватора сведены к минимуму.

$$\text{Мин. линейное напряж. на высоковольтном вводе} = 20.9 \text{ кВ} \quad (9)$$

$$\text{Макс. линейное напряж. на высоковольтном вводе} = 22 \text{ кВ} \quad (10)$$

$$\text{Пик. мощность, потребляемая электроприводом} = 18 \text{ МВт} \quad (11)$$

$$\text{Пик. мощность, отдаваемая электроприводом} = 13.4 \text{ МВт} \quad (12)$$

При учете мощности нагрузок собственных нужд (потребляемую трансформаторами АРТ1 и АРТ2) измеренная пиковая мощность, потребляемая экскаватором, составила 20.8 МВт.

Далее, был выполнен ряд измерений при различных условиях работы экскаватора. На рис. 13 показаны векторные диаграммы для токов и напряжений на высоковольтном вводе. При работе системы в «двигательном режиме», токи опережают напряжения на 14°-15°. При рекуперации энергии токи опережают напряжения на 180° (т.е. чисто активный ток «втекает» обратно в сеть).

<sup>1</sup> Определяется в стандартах IEEE как точка присоединения локальной энергосистемы к энергосистеме более высокого порядка

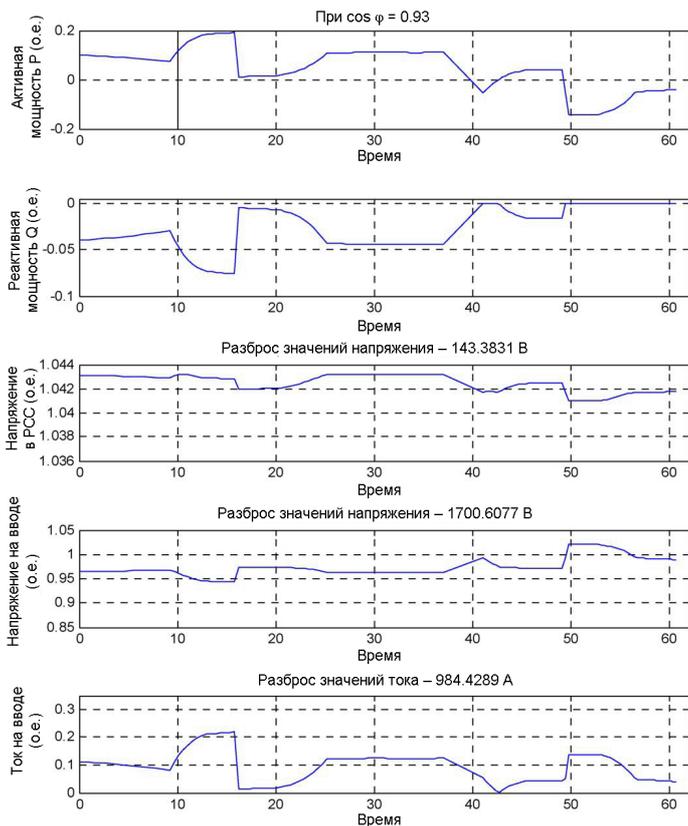


Рис. 11. Поведение энергосистемы при работе экскаватора с опережающим коэффициентом мощности, равным 0.93

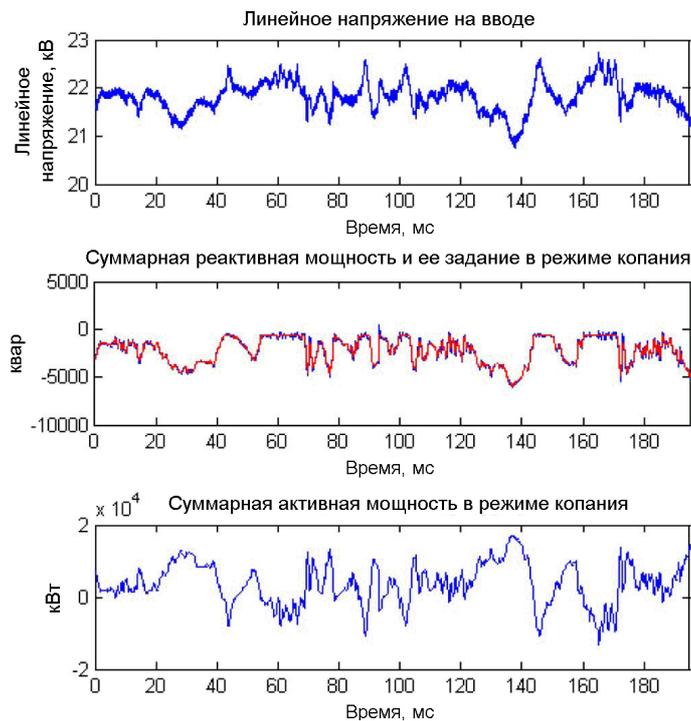


Рис. 12. Линейное напряжение, а также активная и реактивная мощность во время копания

Коэффициент мощности и активная мощность на высоковольтном вводе наблюдались в течение нескольких рабочих циклов экскаватора. На рис. 14 и 15 показаны коэффициент мощности и активная мощность в течение 10 рабочих циклов.

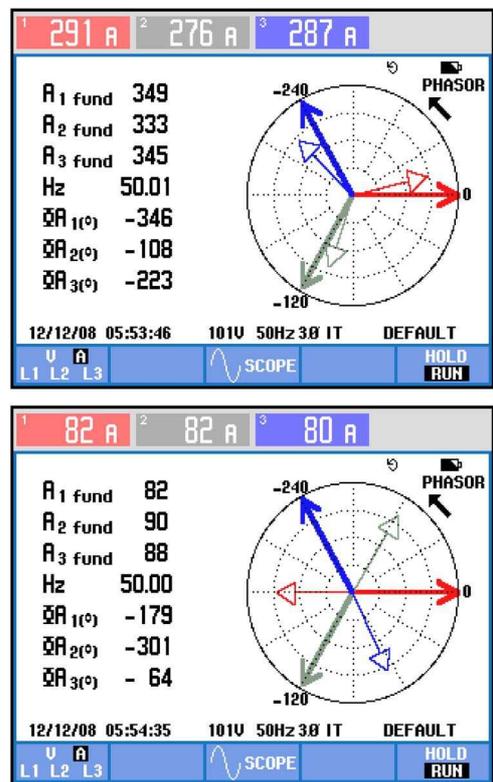


Рис. 13. Векторы напряжений и токов в «двигательном» и «генераторном» режимах

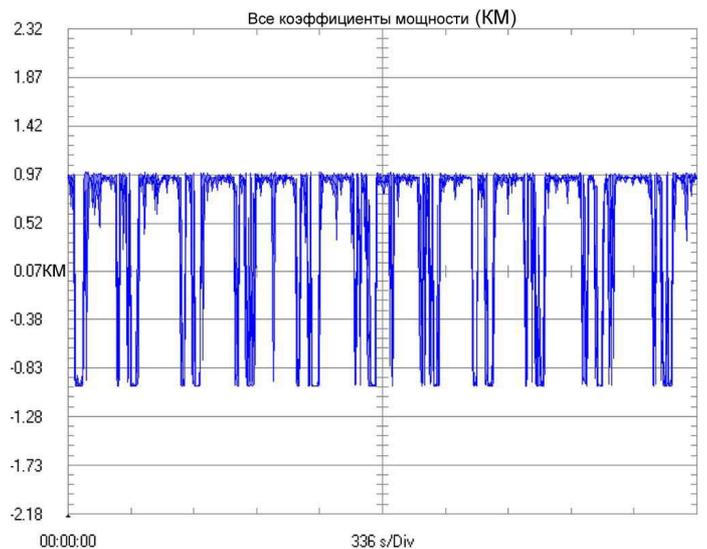


Рис. 14. Коэффициент мощности на высоковольтном вводе

Пиковая активная мощность, измеренная на высоковольтном вводе, составила 15.37 МВт. Как можно видеть из рис.15 нагрузка при копании изменяется скачками, а режим работы может резко меняться с «двигательного» на «генераторный». Указанные скачки нагрузки отражаются на коэффициенте мощности, измеряемом на высоковольтном вводе. Можно видеть, что коэффициент мощности колеблется между 0.96 (опережающий) и -1.

На рис.16 показана кривая реактивной мощности, полученная по результатам измерений на высоковольтном вводе. Пиковая реактивная мощность составила 6.03 Мвар (при опережающем коэффициенте мощности).

На рис.17 показана кривая действующего значения тока в линии (на вводе) в течение семи рабочих циклов экскаватора. Пиковое значение тока составило 410 А (действующее значение). Ток холостого хода составил 27.8 А. Если экскаватор не находится в режиме копания, ток холостого хода обусловлен только нагрузками собственных нужд. Кроме того, была снята кривая линейного напряжения на высоковольтном вводе в течение нескольких рабочих циклов).

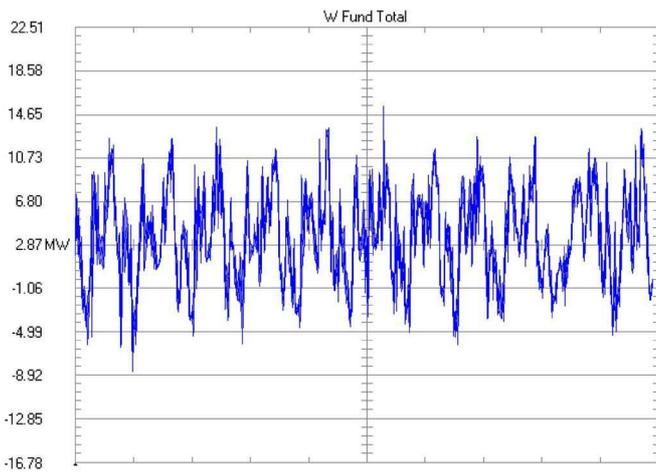


Рис. 15. Кривая активной мощности на высоковольтном вводе в течение 10 рабочих циклов экскаватора

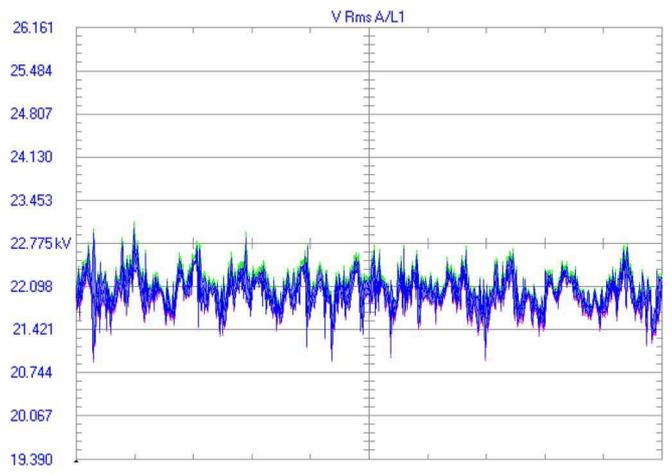


Рис. 18. Действующее значение напряжения во время работы экскаватора

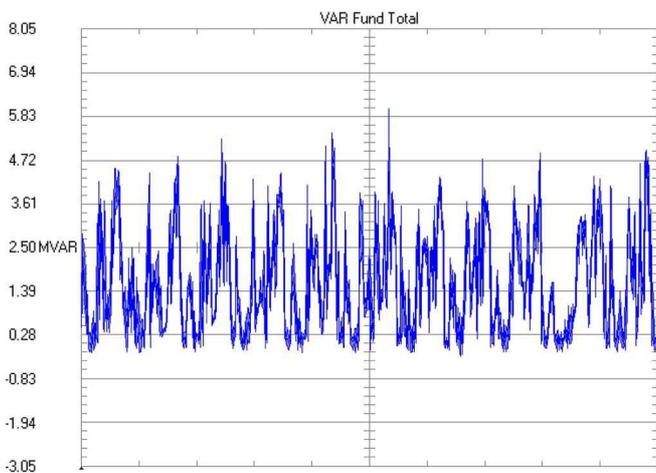


Рис. 16. Кривая реактивной мощности на высоковольтном вводе в течение 10 рабочих циклов экскаватора

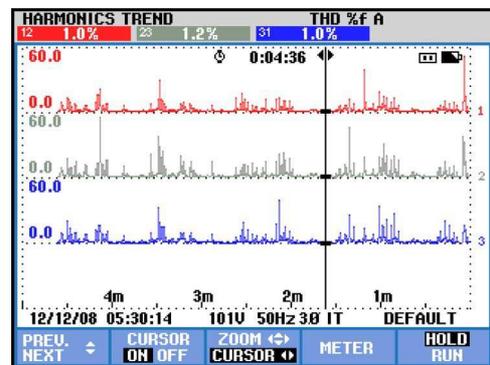


Рис. 19. Кривые THD для трех фазных токов в течение нескольких рабочих циклов

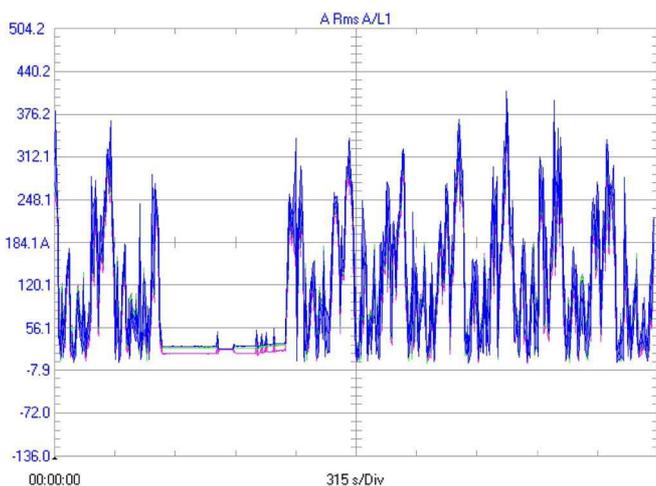


Рис. 17. Действующие значения тока в линии в течение 7 рабочих циклов экскаватора

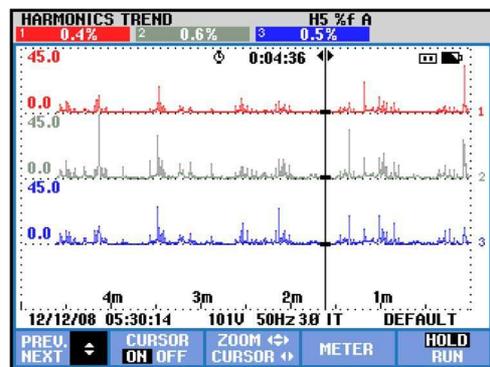


Рис. 20. Кривая уровня 5-й гармоники

На рис. 18 показана кривая действующего значения линейного напряжения в течение нескольких рабочих циклов.

На рис. 19 показаны кривые THD для трех фазных токов в течение нескольких рабочих циклов. Величина THD при полной нагрузке составила 1.2%.

На рис. 20-23 показаны кривые для уровней 5-й, 7-й, 11-й и 13-й гармоник соответственно. С точки зрения стандартов, касающихся эмиссии гармоник [4], наибольшее негативное влияние на энергосистему оказывают гармоники низших порядков. Допустимые уровни эмиссии максимальны для 5-й, 7-й, 11-й и 13-й гармоник. Частота пульсаций, обусловленных коммутацией ключей одного активного выпрямителя, составляет 15 импульсов на период сети (при частоте сети 50 Гц). При этом опорные сигналы ШИМ 30 активных выпрямителей разнесены по фазе и синхронизированы, что обеспечивает эквивалентную частоту коммутации  $750 \times 30 = 22.5$  кГц. Такой подход позволяет значительно снизить уровень гармоник тока, генерируемых системой. Уровни гармоник на рисунках показаны в процентах от величины основной гармоники. Относительный уровень 5-й гармоники составил 0.5%, 7-й гармоники - 0.5%, 11-й гармоники - 0.3% и 13-й гармоники - 0.3%.

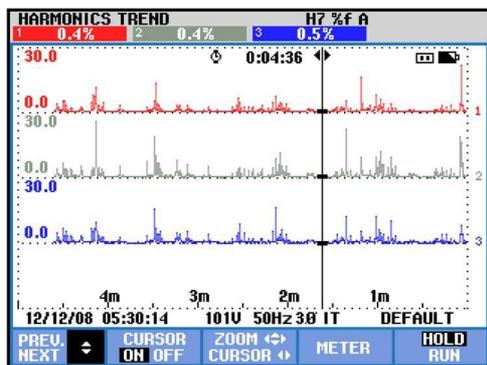


Рис. 21. Кривая уровня 7-й гармоники

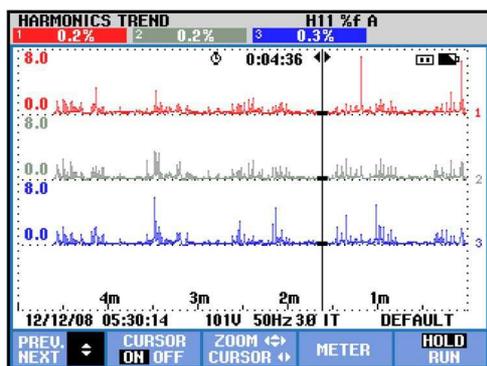


Рис. 22. Кривая уровня 11-й гармоники

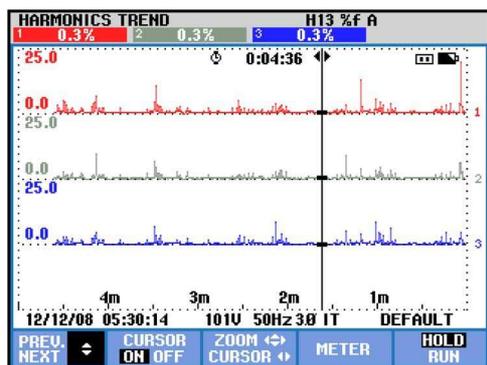


Рис. 23. Кривая уровня 13-й гармоники

До недавнего времени мощные канатно-скребокковые экскаваторы были областью, в которой царили системы генератор-двигатель. Хорошо известно, что системы генератор-двигатель появились на карьерных экскаваторах в 1927 г., сразу вслед за паровыми машинами. Однако успешный ввод в эксплуатацию экскаваторов, питаемых непосредственно от сети переменного тока, показывает, что настало время для внедрения в горнодобывающей промышленности систем без промежуточных электромашинных преобразователей. Рассмотренная в статье система была разработана Siemens Industry Inc. в Alpharetta, штат Джорджия, совместно с Bucyrus International в Милуоки, шт. Висконсин [5], [6]. Применение мощных тяговых инверторов и активных выпрямителей позволяет минимизировать или полностью исключить флуктуации напряжения и эмиссию гармоник при использовании машин типоразмера 8750. Данное решение защищено патентом США [7].

Поиск неисправностей на экскаваторах, питаемых непосредственно от сети переменного тока, стал значительно проще благодаря использованию нового контроллера с сенсорным экраном. Графический интерфейс и текстовые сообщения позволяют обслуживающему персоналу выявлять неисправные компоненты и устранять неполадки, выполнять процедуры тестирования и контролировать состояние системы во время работы. Применение передовой технологии телемониторинга обеспечивает доступ к данным

диагностического компьютера с подстанции, что повышает эксплуатационную готовность экскаватора.

## V. Выводы

Появление новых силовых схем с непосредственным питанием от сети переменного тока и доступность мощных IGBT-модулей сделали возможной разработку крупных систем электропривода, максимально адаптированных для применения в канатно-скребокковых экскаваторах. Теперь электроприводы экскаваторов с прямым питанием стали реальностью. Использование IGBT позволяет значительно улучшить характеристики инверторов и активных выпрямителей, причем в обоих случаях могут использоваться одни и те же приборы. Модульная архитектура системы позволяет существенно сократить общее количество компонентов.

В настоящей статье приведены результаты измерений качества электроэнергии на экскаваторе традиционной конструкции, в настоящее время находящемся в эксплуатации. Полученные результаты показывают, что система хорошо поддерживает заданные значения активной и реактивной мощности. Это позволяет добиться желаемой величины коэффициента мощности на высоковольтном вводе, а также регулировать напряжение на нем. Выбранные настройки получены в результате исследования энергосистемы. Во всех режимах работы напряжение в звене постоянного тока оставалось стабильным. Кроме того, эмиссия гармоник в сеть с большим запасом удовлетворяет требованиям стандартов ( $THD < 5\%$ ). Уровни гармоник низшего порядка (5-я, 7-я, 11-я и 14-я) не превышают 0.5%. Использование активных выпрямителей улучшает совместимость электрооборудования экскаватора с питающей сетью. Это позволяет соответствовать самым жестким стандартам, относящимся к ограничению уровня гармоник.