

Греков Э.Л.¹, Филимонов С.И.²¹ ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет»² ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет»

СРАВНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ЭКСКАВАТОРНЫМ ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩИМ УСТРОЙСТВОМ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА «ТИРИСТОРНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ-ДВИГАТЕЛЬ»

Современный экскаваторный электропривод, выполненный по системе «тиристорный преобразователь-двигатель» (ТП-Д), необходимо применять с фильтрокомпенсирующим устройством (ФКУ). Исходя из опыта эксплуатации, а также из простоты и надежности применяемых схем, на карьерных экскаваторах зарекомендовало себя ФКУ ступенчатого типа. Применение ФКУ обеспечивает требуемое качество электрической энергии (ЭЭ), а также коэффициент мощности $\text{tg}\varphi = 0,33-0$. Для исследования алгоритмов управления ФКУ и их влияния на показатели качества ЭЭ была разработана имитационная модель в Matlab/Simulink, учитывающая особенности реализации цифровой системы управления и работы силовой части электроприводов. В качестве задающих и возмущающих сигналов были взяты реальные графики работы экскаватора ЭКГ-12К. Для подтверждения адекватности сравнивались результаты моделирования с реальными графиками. Проведены исследования трех основных методов формирования управляющих сигналов на включение ФКУ: по реактивной мощности электроприводов, по сигналам обратной связи по току якоря и регуляторов напряжения. Так как электроприводы экскаватора распределены по двум силовым трансформаторам со своими ФКУ, для каждого метода предложены три способа управления: раздельное включение ступеней и совместное, по суммарному или наибольшему сигналу. Получены зависимости изменения времени включения ступени от уровня задания и длины питающей линии 6 кВ. Исследованы показатели качества ЭЭ и энергетические показатели. Получены их зависимости от длины питающей линии.

Ключевые слова: фильтро-компенсирующее устройство, экскаваторный электропривод, тиристорный преобразователь.

ВВЕДЕНИЕ

Необходимым условием при проектировании экскаваторного электропривода, выполненного по системе ТП-Д, является наличие ФКУ [1]. С помощью ФКУ обеспечивается требуемое качество ЭЭ согласно [2], а также коэффициент мощности $\text{tg}\varphi = 0,33-0$ согласно техническим заданиям на проектирование [3, 4]. В данный момент из всего разнообразия производимых ФКУ под критерии минимальной стоимости, простоты и надежности схемы попадают только две группы ФКУ: ступенчатого типа (ФКУ-С) и с непрерывно «косвенным» регулированием (ФКУ-К). Тип ФКУ-С – это сборки, состоящие из реакторов и конденсаторов, которые по сигналу управления подключаются коммутационными аппаратами. Тип ФКУ-К – это постоянно подключенная к сети фильтро-конденсаторная сборка и тиристорно-реакторная, регулирующая группа, осуществляющая плавное регулирование реактивной мощности с помощью изменения угла управления тиристорами [6]. Среди этих групп на экскаваторе получили распространение ФКУ типа ФКУ-С. ФКУ устанавливается на борту экскаватора и подключается к каждому силовому трансформатору со стороны обмотки низкого напряжения.

ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ РЕШЕНИЯ

На рис. 1 в качестве примера представлена схема электроснабжения карьерного экскаватора ЭКГ-12К с главными приводами и ФКУ. Применяемое ФКУ имеет неотключаемую ступень мощностью 200 кВАр и две подключаемые ступени мощностью по 300 кВАр на каждый силовой трансформатор. Мощными приемниками электрической энергии на борту экскаватора являются приводы подъема (Н), напора (С) и поворота (S). Экскаватор подключается по воздушной линии напряжением 6 кВ к главной понизительной подстанции (ГПП).

Структурно однолинейная схема похожа на схему электроснабжения экскаватора ЭШ-6/45, представленную в [3]. Однако, в отличие от драглайна, главные приводы ЭКГ-12К распределены по трансформаторам неравномерно. А так как у электроприводов разные нагрузочные диаграммы, то и силовые трансформаторы загружены неравномерно.

В представленных экскаваторных электроприводах для управления применяется двухконтурная система регулирования тока и напряжения с зависимым задатчиком интенсивности ЗЗИ [4, 5]. Структурная схема электропривода напора приведена на рис. 2. В приводе подъема каждый двигатель имеет индивидуальное питание и два индивидуальных контура тока, управляемых от одного регулятора напряжения.

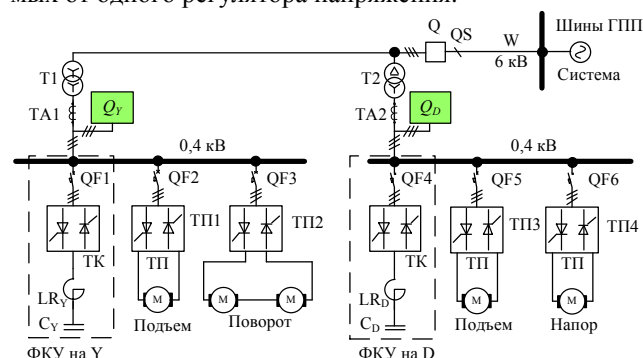


Рис. 1. Однолинейная схема электроснабжения экскаватора ЭКГ-12К

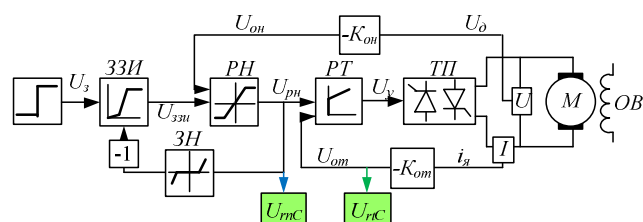


Рис. 2. Структурная схема электропривода напора

Экскаватор является потребителем с резкопеременной нагрузкой. В связи с этим в питающей сети в первую очередь возникают колебания (КН) и отклонения напряжения (ОН). Кроме того, на эти показатели качества ЭЭ значительно влияет питающая экскаватор линия, которая может достигать в длину более 15 км. А как известно [6, 7], с увеличением длины питающей линии ОН и КН в точке передачи ЭЭ изменяются. Наибольшее ОН происходит в моменты копания, когда токи приводов подъема и напора максимальны. В эти периоды необходимо подключать ступени ФКУ как можно раньше для компенсации отрицательных ОН ($\delta U_{(t)}$). С другой стороны, при компенсации наброса реактивной мощности (РМ) нагрузки подключаемые ступени ФКУ должны включаться так, чтобы не вызвать дополнительных КН [8]. Поэтому представляет интерес исследование различных алгоритмов управления с точки зрения быстродействия включения ступеней ФКУ.

Таким образом, правильное управление экскаваторным ФКУ является сложной и важной задачей, при решении которой необходимо учитывать много факторов.

В [3] были проведены исследования методов включения ступеней ФКУ в зависимости от режимов работы электроприводов и даны рекомендации по выбору уставок. Но на этапе наладки при управлении по суммарному току необходимо каждый раз настраивать уставки включения ФКУ в зависимости от режима работы экскаватора.

Кроме того, доподлинно не известно в какой степени изменяются показатели качества в зависимости от длины питающей линии при работе экскаватора в карьере. Поэтому для этих целей была разработана имитационная модель экскаватора ЭКГ-12К в Matlab/Simulink, представленная на **рис. 3**. Структура модели состоит из подсистем, моделирующих двигатели, тиристорные преобразователи и питающую сеть 6 и 0,4 кВ. Последняя подсистема «Сеть 6/0,4 кВ» представлена на **рис. 4**.

Разработанная имитационная модель отличается от энергетической, представленной в [3], и позволяет производить оценку следующих показателей качества электрической энергии согласно [1]: КН (кратковременная доза фликера P_{st}), ОН, суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения K_U , коэффициенты гармонических составляющих напряжения пятого $K_{U(5)}$ и седьмого $K_{U(7)}$ порядка, коэффициенты несимметрии напряжения по обратной K_{2U} и нулевой K_{0U} последовательности. Помимо этого модель рассчитывает коэффициенты гармонических составляющих тока K_I , $K_{I(5)}$, $K_{I(7)}$, коэффициенты несимметрии тока K_{2I} и K_{0I} , энергетические показатели экскаватора, среднецикловой ток в линии, а также отклонения активной и реактивной мощности. Последние величины наглядно показывают, сколько экскаватор потребил и сгенерировал активной и реактивной мощностей в сети 6 кВ при копании в цикле.

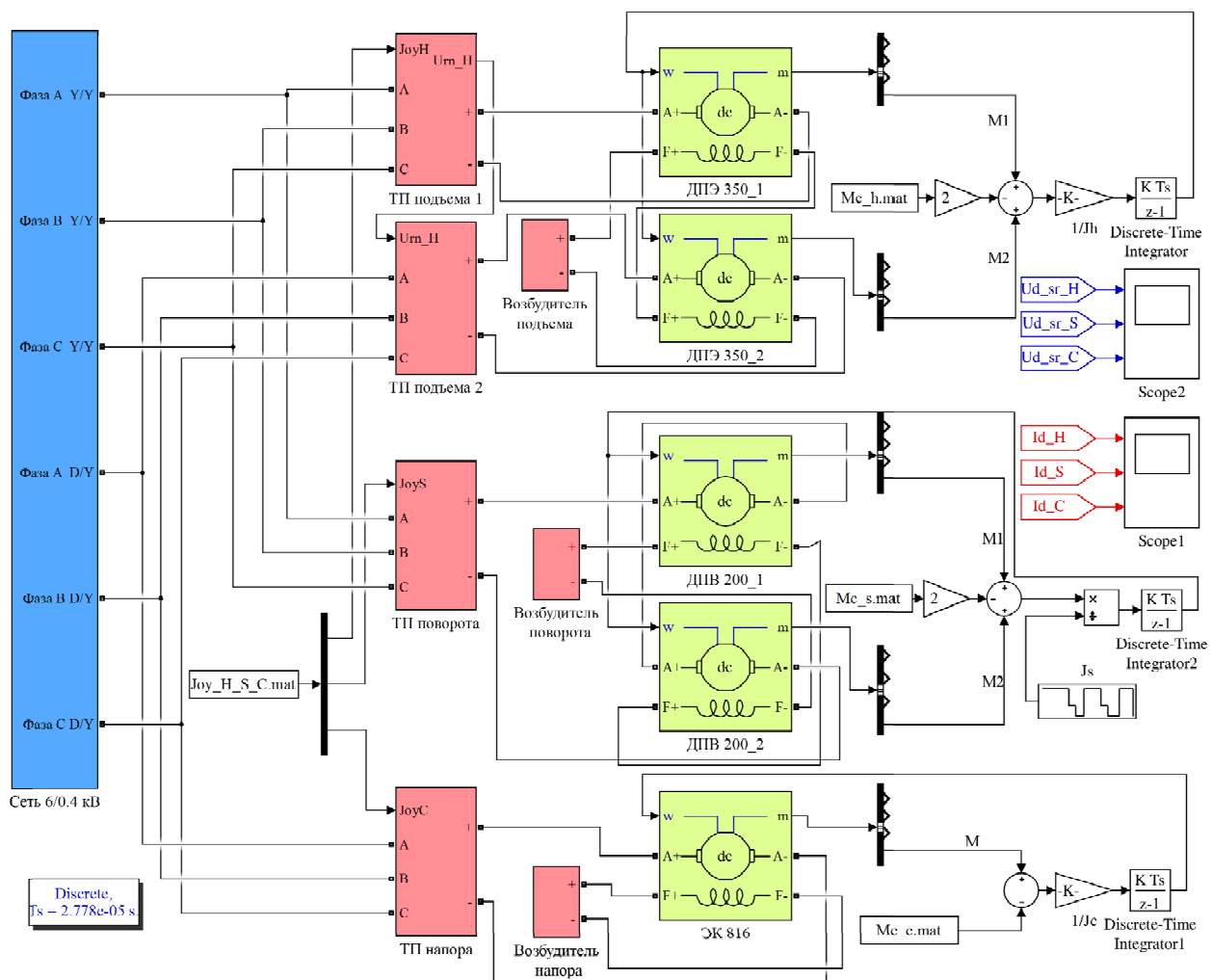


Рис. 3. Имитационная модель экскаватора ЭКГ-2К

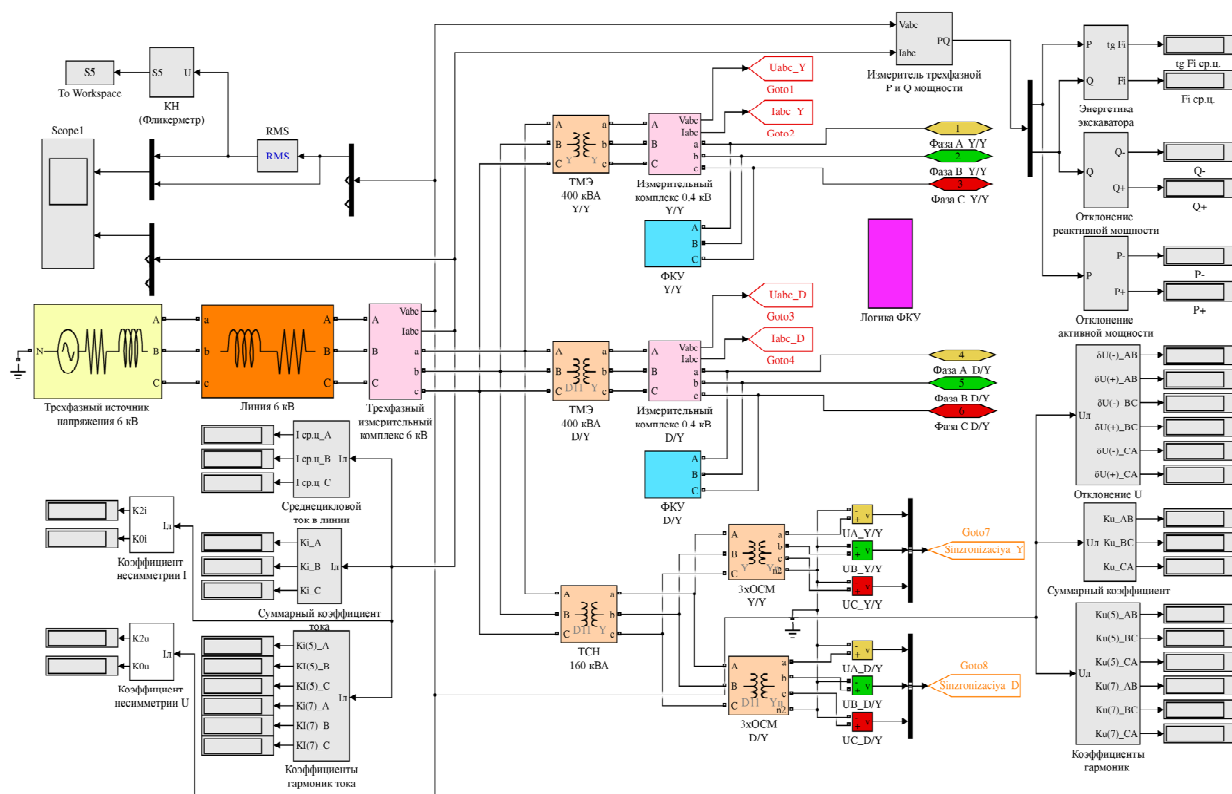


Рис. 4. Подсистема «Сеть 6 и 0,4 кВ»

Структура подсистем возбудителей для электроприводов экскаватора является одинаковой. Поэтому в качестве примера на **рис. 5** представлена система возбуждения привода поворота. Возбудители являются неререверсивными и моделируются источником напряжения, замкнутым обратной связью по току с ПИ-регулятором. Проявление нелинейности магнитной системы двигателя реализуется блоком «Lookup Table» в цепи задания. Это позволяет моделировать явление «насыщения», применяя стандартные модели ДПТ. Такая реализация возможна, так как исследования в статье направлены не на особенности динамики электроприводов, а на систему управления ФКУ. Для ослабления магнитного потока в моменты реверса двигателя используется обратная связь по напряжению « $U_d S$ » на выходе преобразователя в якорной цепи.

Для работы представленной модели необходимо иметь информацию по задающим сигналам с джойстиков «Joy_H_S_C.mat», а так же по моментам статических нагрузок « M_c » каждого привода и моментам инерции « J » (см. **рис. 3**). Такую информацию можно получить, анализируя данные с «черного ящика» (ЧЯ) цифровой системы управления экскаватора ЭКГ-12 К производства АО «Рудоавтоматика им В.В. Сафошина». Цифровая система позволяет регистрировать весь процесс экскавации на протяжении длительного промежутка времени.

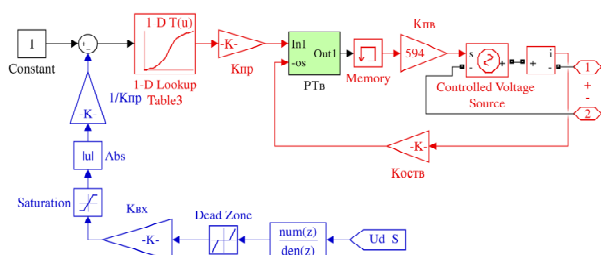


Рис. 5. Структура подсистемы «Возбудитель поворота»

Рассмотрим работу модели на промежутке времени, равном 100 с. За это время машинист успевал совершить почти три цикла экскавации. Сигналы управления с джойстиков, токи возбуждения I_e и якоря I_d , напряжения U_d каждого привода были записаны в соответствующие файлы с расширением *.mat программного комплекса Matlab/Simulink. После этого была разработана вспомогательная модель, в которой по уравнению движения были вычислены статические моменты M_c (**рис. 6, в, и, к**) и определены моменты инерции J электроприводов. Графики «Joy» и « M_c » были введены в исходную модель (см. **рис. 3**) и ею обработаны. В результате получены переходные процессы тока I_d и напряжения U_d (**рис. 6**), идентичные тем, которые были взяты из ЧЯ. Например, на **рис. 6, б** и **г** представлены соответственно смоделированная и реальная осциллограммы тока I_d привода подъема. Сравнение полученных осциллограмм говорит о том, что модель является адекватной.

Для управления экскаваторным ФКУ целесообразно рассмотреть три основных метода:

- 1) по реактивной мощности электроприводов **РМЭ**;
- 2) по сигналам обратных связей по току главных приводов **ОСТ**;
- 3) по сигналам регуляторов напряжений главных приводов **СРН**.

Первый метод управления основывается на количественной оценке реактивных мощностей электроприводов, подключенных к силовым трансформаторам Т1 и Т2. Вычисление реактивной мощности происходит в блоках « Q_Y » и « Q_D » по сигналам с трансформаторов тока ТА1 и ТА2 и напряжениям (см. **рис. 1**). Представленный метод применялся в

[3] для определения оптимальной величины срабатывания уставок ступеней ФКУ. Метод был адаптирован под энергетическую модель. В результате было выявлено, что при его использовании независимо от режима работы для обеспечения минимального среднециклового тока использовался только один набор уставок.

Второй метод управления подразумевает использование сигналов обратных связей по току каждого привода экскаватора. Эта связь показана на **рис. 2**, а ее сигнал поступает в блок « U_{rc} ». При исследовании в [3] данного метода выявлено, что в разных режимах работы необходимо каждый раз выбирать новые уставки ФКУ для минимального среднециклового тока.

Последний, третий метод в проведенных в [3] исследованиях не участвовал, так как применялась энергетическая модель, не учитывающая подчиненную систему управления. Этот метод используется в системах управления ФКУ производства АО «Рудоавтоматика им. В.В. Сафошина». При его применении необходимо использовать сигналы с выходов регуляторов напряжения (РН) каждого привода экскаватора. На **рис. 2** эти сигналы поступают в блок « U_{mc} ».

При технической реализации методов управления ФКУ на практике и при компьютерном моделировании можно выделить три способа:

1. совместное управление ФКУ «Y» и «D» при суммировании сигналов;
2. совместное управление ФКУ «Y» и «D» при сравнении сигналов;
3. раздельное управление ФКУ «Y» и «D».

Соответственно ступени ФКУ одного уровня, подключаемые к разным трансформаторам, могут включаться либо одновременно, либо в разное время.

Первый способ подразумевает суммирование сигналов в каждом из рассматриваемых методов. При реализации данного способа в методах СРН и ОСТ необходимо сигналы взять по модулю и согласовать по коэффициентам обратных связей по току якоря:

$$U_{rn} = 2|U_{rnH}| + |U_{rnC}| \cdot \frac{K_{omH}}{K_{omC}} + |U_{rnS}| \cdot \frac{K_{omH}}{K_{omS}}, \quad (1)$$

$$U_{rt} = 2 \cdot |U_{rtH}| + |U_{rtC}| \cdot \frac{K_{omH}}{K_{omC}} + |U_{rtS}| \cdot \frac{K_{omH}}{K_{omS}}, \quad (2)$$

где K_{omH} , K_{omS} , K_{omC} – коэффициенты обратных связей по току приводов экскаватора.

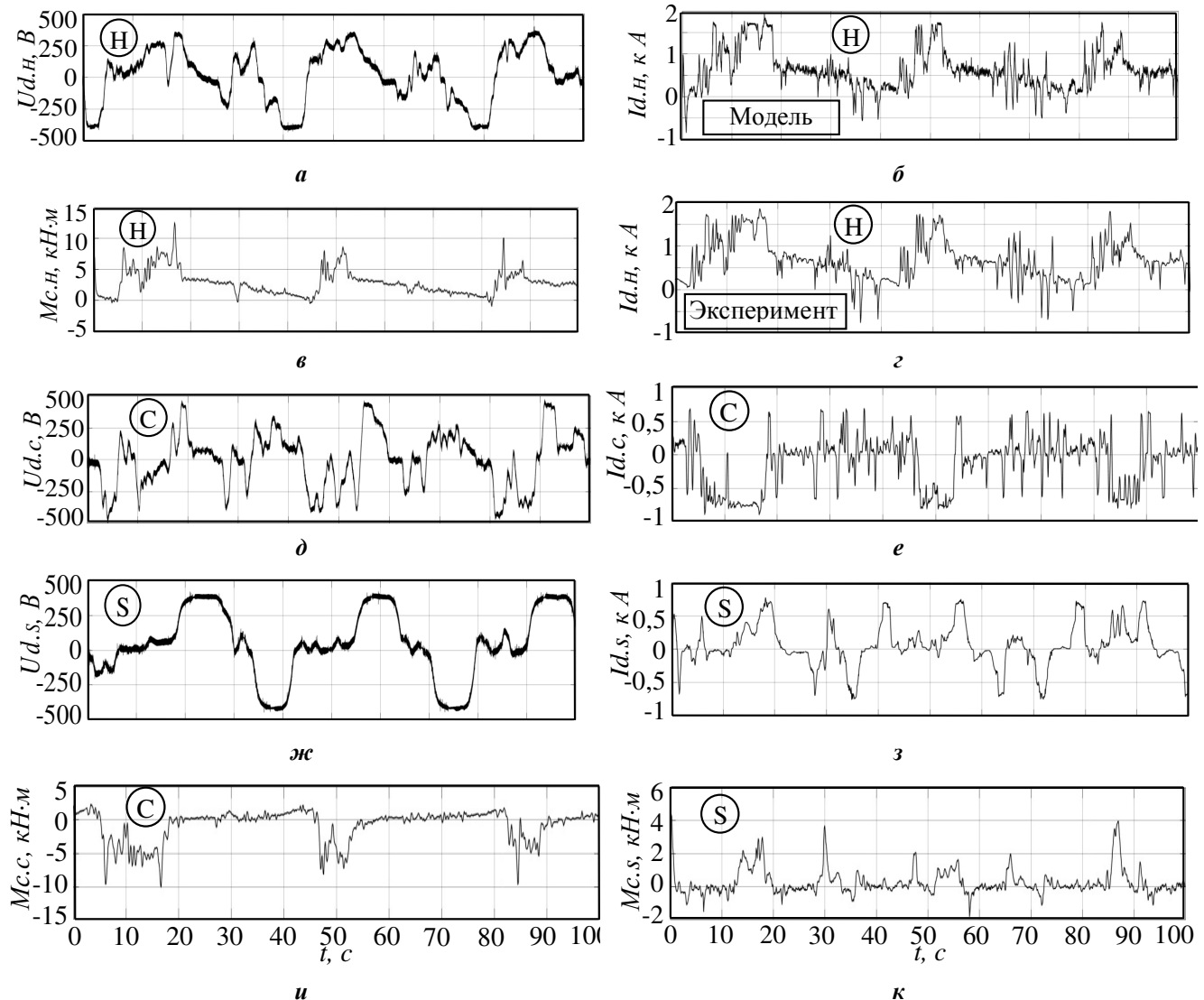


Рис. 6. Осциллограммы а, б, в – U_d, I_d, M_c привода подъема; г – I_d привода подъема реальная; ж, з, к – U_d, I_d, M_c привода поворота; д, е, и – U_d, I_d, M_c привода напора

В методе РМЭ суммируются не только сигналы по реактивным мощностям электроприводов, подключенных к трансформаторам Т1 «Q_Y» и Т2 «Q_D», но и значения установленной мощности неотключаемых и подключаемых ступеней ФКУ. Сигналы из блоков «Q_Y» и «Q_D» – это оставшаяся некомпенсированная реактивная мощность экскаватора $Q_{э.нecк}$:

$$Q_{upr} = Q_{э.нecк} + 2(Q_{неоткл} + s_1 \cdot Q_{1ст} + s_2 \cdot Q_{2ст}), \quad (3)$$

где $Q_{э.нecк} = Q_Y + Q_D$ – некомпенсированная реактивная мощность экскаватора, кВАр; $Q_{неоткл}$, $Q_{1ст}$, $Q_{2ст}$ – реактивные мощности неотключаемой и подключаемых ступеней, кВАр; 2 – количество силовых трансформаторов, к которым подключены ступени ФКУ; s_1 и s_2 – функции включения ступеней $Q_{1ст}$ и $Q_{2ст}$.

После суммирования сигналов в любом рассматриваемом методе формируются импульсы управления ступенями ФКУ (рис. 7). Суммарный сигнал сравнивается с уставками и определяет состояние RS триггеров. Для того чтобы ступени ФКУ не отключались часто из-за резкопеременного суммарного сигнала, устанавливаются блоки «Задержка1» и «Задержка2», обеспечивающие выдержку времени на отключение.

В способе совместного управления при сравнении сигналов необходимо объединить приводы, подключаемые к одному трансформатору. Как и в предыдущем случае, при реализации данного способа в методах СРН и ОСТ сигналы берутся по модулю и согласовываются соответственно равенствам:

$$U_{rn1} = |U_{rnH}| + |U_{rnC}| \cdot \frac{K_{omH}}{K_{omC}}; \quad (4)$$

$$U_{rn2} = |U_{rnH}| + |U_{rnS}| \cdot \frac{K_{omH}}{K_{omS}}; \quad (5)$$

$$U_{rt1} = |U_{rtH}| + |U_{rtC}| \cdot \frac{K_{omH}}{K_{omC}}; \quad (6)$$

$$U_{rt2} = |U_{rtH}| + |U_{rtS}| \cdot \frac{K_{omH}}{K_{omS}}. \quad (7)$$

При использовании метода РМЭ необходимо определять реактивную мощность до компенсации для каждого силового трансформатора отдельно:

$$Q_{upr_Y} = Q_Y + Q_{неоткл} + s_{1_Y} \cdot Q_{1ст} + s_{2_Y} \cdot Q_{2ст}; \quad (8)$$

$$Q_{upr_D} = Q_D + Q_{неоткл} + s_{1_D} \cdot Q_{1ст} + s_{2_D} \cdot Q_{2ст}. \quad (9)$$

В этом способе сигналы на выходе триггеров, состояние которых определяется уставками на включение и отключение, объединяются с помощью функции «ИЛИ» (рис. 8). Таким образом, на вход блока задержки поступает сигнал, если хотя бы один из триггеров принимает состояние «1».

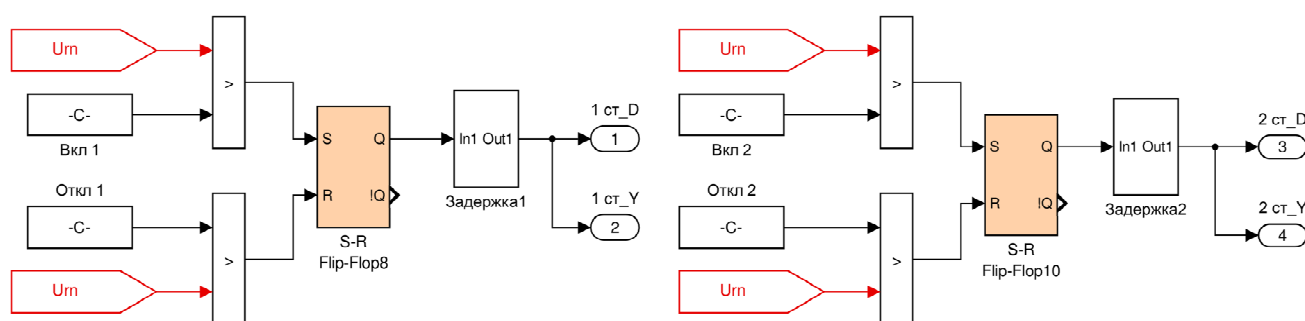


Рис. 7. Формирование импульсов управления при суммировании сигналов в методе СРН

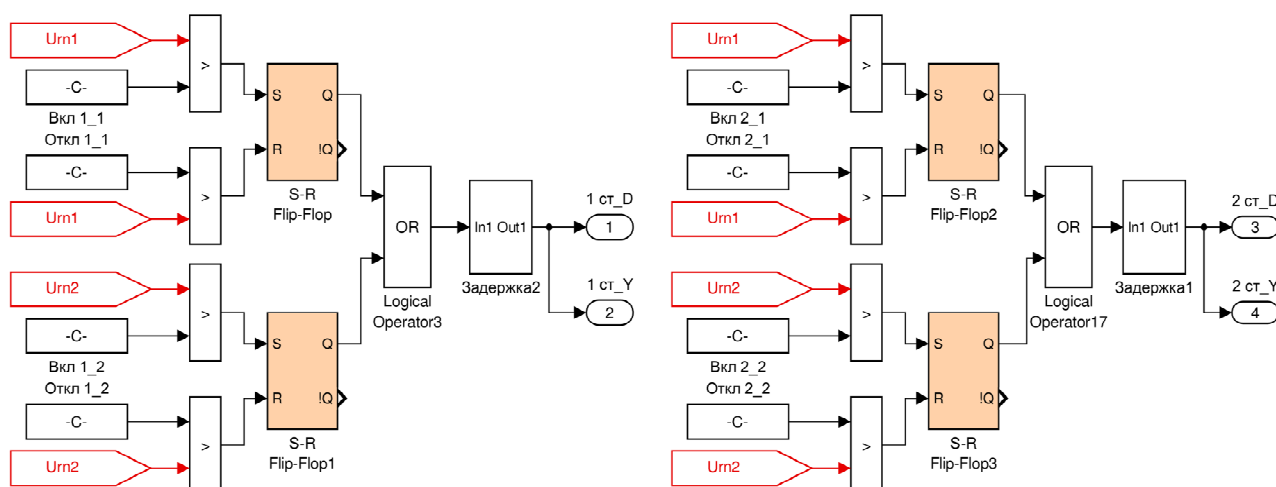


Рис. 8. Формирование импульсов управления при сравнении сигналов в методе СРН

При использовании раздельного управления ступенями ФКУ в применяемых методах необходимо произвести объединение и согласование сигналов по формулам (4) – (7). А при использовании метода РМЭ использовать равенства (8) и (9). Таким образом, получаются сигналы, которые позволяют сформировать импульсы управления ступенями ФКУ раздельно по каждому трансформатору.

ИССЛЕДОВАНИЯ АЛГОРИТМОВ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Чтобы произвести оценку каждого из методов управления по быстродействию, на разработанной модели был проведен эксперимент. Привод подъема, как самый мощный на экскаваторе, разгонялся без статической нагрузки при различных заданиях U_3^* . После этого электропривод нагружался активным статическим моментом, равным двум номинальным, так, чтобы в якорных цепях появились токи, близкие к стопорным значениям. Такая ситуация характерна для режима копания при столкновении ковша с плотной или плохо взорванной породой. При таких токах, согласно рассмотренным методам, сработает как минимум первая ступень ФКУ. Время включения ступени фиксируется относительно времени приложения нагрузки. Зависимости $t_{cp} = f(U_3^*)$ для каждого из рассматриваемых методов при длине питающей линии 5, 10 и 20 км представлены на рис. 9. Как видно, независимо от длины питающей линии большинство графиков являются возрастающими.

В методе РМЭ (кривая 1) с ростом задания U_3^* возрастает время срабатывания ступени t_{cp} . А на полном задании при длине линии 20 км имеет наибольшую задержку по времени на включение. При уменьшении U_3^* рассматриваемый метод срабатывает быстрее по сравнению с другими. Это объясняется тем, что при полном задании U_3^* напряжение преобразователя U_d является максимальным и при набросе нагрузки из сети ТП потребляет активную мощность (АМ) и РМ. Эта РМ является сравнительно небольшой и ступени ФКУ включатся, как только скорость вращения двигателя и, следовательно, напряжение на якоре снизятся под действием нагрузки до уровня, когда величина РМ будет достаточной. С уменьшением задания U_3^* напряжение преобразователя U_d также уменьшается, а вместе с ним и поток АМ из сети. Однако потребляемая РМ растет, и время включения ФКУ снижается. Таким образом, метод РМЭ во всех случаях при небольшом U_3^* является самым оперативным.

Под номером 2 представлена кривая для метода ОСТ. При длинной линии и максимальном U_3^* метод работает быстрее, чем РМЭ. Однако в большинстве случаев является наихудшим по быстродействию. Это связано с тем, что при использовании этого сигнала приходится применять фильтр с постоянной времени 10 мс для вычисления среднего значения.

Кривая под номером 3 представляет метод СРН. Здесь уставки настроены по методике, предложенной в [3]. Как видно по рис. 8, независимо от длины линии и U_3^* время t_{cp} ступени ФКУ изменяется в пределах периода сетевого напряжения. Это значит, что фактически между РН и набросом нагрузки отсутствует связь

через задание U_3^* , а график 3 стремится к прямой линии. Время задержки на включение ступени формируется из инерционной постоянной времени самого РН, а также времени реакции системы на наброс нагрузки.

Выход РН и обратная связь по току якоря – это эквивалентные сигналы. Но так как последний фильтруется, то включение ФКУ происходит с большей задержкой. Следовательно, удобнее использовать метод СРН вместо ОСТ.

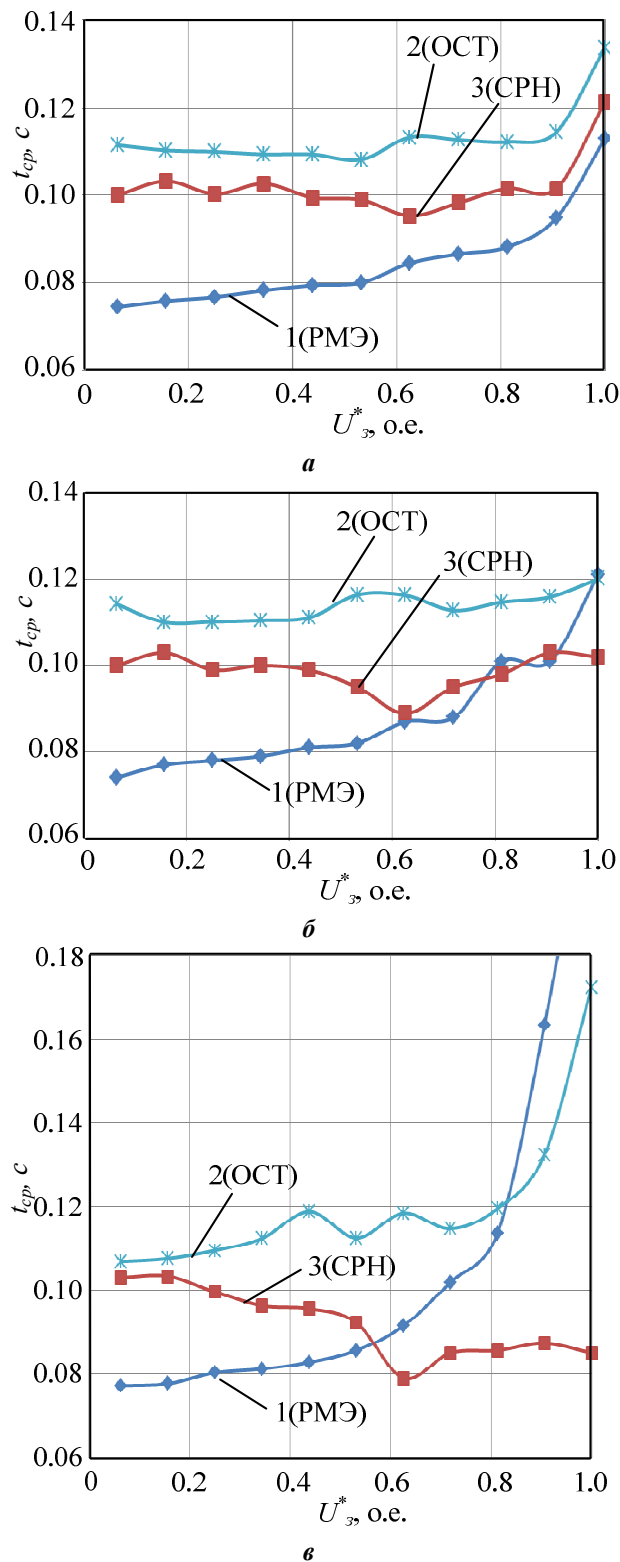


Рис. 9. Время включения первой ступени ФКУ при длине линии а – 5 км, б – 10 км, в – 20 км

Теперь рассмотрим, как влияют методы управления на качество ЭЭ в сети 6 кВ при питании от линий разной длины. Для питания экскаватора принимается линия одного сечения А-70 и не имеющая «скруток». Длина линии изменялась от 2,5 до 20 км, что характерно для карьерной сети. Линейное напряжение источника питания 6,3 кВ, мощность короткого замыкания $S_{кз} = 300$ МВА. При этом необходимо помнить, что с ростом длины линии мощность КЗ на вводе экскаватора снижается экспоненциально (на 20 км $S_{кз} = 3,5$ МВА).

В исследованиях проведена оценка следующих показателей качества и энергетики экскаватора: ОН ($\delta U_{(+)}$ и $\delta U_{(-)}$), КН (P_{st}), K_U , $I_{ср.ц}$, $\text{tg}\varphi_{ср.ц}$. Согласно [2] ОН, K_U и КН измеряются на интервалах 10 мин и не должны превышать установленных значений в течение 100, либо 95% времени интервала в 1 неделю. Для оценки этих показателей качества даже на 10-минутном интервале требуется существенная вычислительная мощность компьютера. К тому же при оценке P_{st} необходимо помнить, что резкопеременная нагрузка экскаватора хоть и циклична, но изменяется случайным образом. В связи с этим было принято для расчета показателей качества ОН и K_U и всех энергетических показателей усреднить величины на 100-секундном интервале времени. Для оценки кратковременной дозы фликера P_{st} на 10-минутном интервале предложенная модель (см. **рис. 3**) упрощалась, исключив все остальные показатели. Длительная доза фликера P_{lt} исключается из расчета, так как интервал ее вычисления составляет 2 ч.

Чтобы оценить несимметричность нагрузки, показатели ОН и коэффициенты тока и напряжения в модели рассчитываются для трех фаз. Анализ результатов исследования показал, что для экскаватора характерна практически симметричная нагрузка. Так, например, при расчете ПКЭ в методе РМЭ при раздельном управлении и длине линии 12,5 км коэффициенты несинусоидальности для трех линейных напряжений составляют 6,74, 6,73 и 6,72%. Наибольшее отличие этих величин от среднего значения – менее 0,15%. Коэффициенты несинусоидальности трех линейных токов составляют 23,99, 24,04 и 22,27%. Здесь наибольшее отличие – менее 5%. Помимо этого, на незначительную несимметрию указывает коэффициент $K_{2U} = 0,39\%$, который в 5 раз меньше допустимой величины 2%, установленной в [2]. В дальнейшем результаты исследований приводятся относительно тока фазы А и линейного напряжения АВ.

Зависимости всех представленных показателей от длины питающей линии показаны на **рис. 10**. По ним можно сделать следующие выводы. Коэффициент несинусоидальности K_U (**рис. 10, а**) при работе экскаватора без ФКУ с увеличением длины линии резко увеличивается, а при длине более 2,5 км выходит за предельно допустимое значение 8%. Применение ФКУ значительно снижает K_U , а выход за предельные 8% происходит на интервале от 15 до 20 км. Причем большая граница соответствует методу РМЭ.

Наименьшая зависимость кратковременной дозы фликера P_{st} от длины линии соответствует режиму работы без ФКУ (**рис. 10, б**). Это объясняется тем, что включения ступеней ФКУ создают дополнительные колебания напряжения. Наибольшие значения P_{st} по-

лучаются при использовании метода РМЭ при любых способах. Этот метод чувствителен не только к нагрузке, но и выходному напряжению (углам управления ТП). Так как в цикле экскавации скорость вращения двигателей так же часто меняется, как и нагрузка, то, следовательно, и частота включений ступеней ФКУ получается больше, чем в методе СРН. Что и отражается в виде ухудшения показателя P_{st} . Доза фликера практически линейно увеличивается от длины линии. С другой стороны, ни одна из представленных зависимостей не укладывается в норму $P_{st} = 1,38$ согласно [2].

Показатели качества ОН также в большей степени зависят от длины линии. Система ТП-Д без ФКУ приводит к значительному снижению $\delta U_{(+)}$ и увеличению $\delta U_{(-)}$. При длине линии более 12,5 км показатель $\delta U_{(-)}$ превышает допустимые 10%. Следовательно, система ТП-Д без ФКУ при длинных линиях окажется в аварийном режиме по ОН. Кроме того, по **рис. 10, д** видно уменьшение $I_{ср.ц}$ с ростом L , а изменение $\text{tg}\varphi_{ср.ц}$ (**рис. 10, е**) имеет оптимум. Это говорит о том, что система управления ТП при уменьшении напряжения в сети уменьшает углы управления тиристорами, что, соответственно, уменьшает уровень РМ, $I_{ср.ц}$, $\text{tg}\varphi_{ср.ц}$. Однако при значительных длинах линии и уменьшении напряжения в сети электроприводы экскаватора не могут достичь максимально заданных скоростей, и производительность экскаватора падает. Поэтому после 10 км уменьшается потребление АМ и $\text{tg}\varphi_{ср.ц}$ увеличивается.

При включенном ФКУ показатель $\delta U_{(-)}$ во всех методах растет при увеличении длины линии, но не выходит за пределы 10%. Положительное $\delta U_{(+)}$ в большей степени изменяется у метода РМЭ при сравнении сигналов. Следовательно, при этом способе управления наблюдаются значительные величины генерируемой ступенями ФКУ РМ и числа их включений. Об этом свидетельствует большое значение $I_{ср.ц}$ (см. **рис. 10, д**). А после 12,5 км происходит сильная перекомпенсация РМ (см. **рис. 10, е**). При остальных способах метода РМЭ положительные $\delta U_{(+)}$ сначала немного уменьшаются при увеличении линии до 7,5 км. Это связано с ростом падения напряжения ΔU в линии и небольшим увеличением числа включений ступеней ФКУ. Затем с изменением длины линии $\delta U_{(+)}$ число включений ступеней значительно увеличивается, и после 15 км происходит существенная перекомпенсация РМ в цикле (см. **рис. 10, е**). При этом ток $I_{ср.ц}$ значительно возрастает.

Использование метода СРН при любых способах приводит сначала к уменьшению $\delta U_{(+)}$, а затем к его увеличению. Наименьшее отклонение имеет способ раздельного управления. Объяснение этого точно такое же, как в предыдущем случае. Только для способа раздельного управления не происходит перекомпенсация на длинной линии. Во всех способах метода СРН наблюдается наименьшее значение $\text{tg}\varphi_{ср.ц}$ и фактически линейное увеличение среднециклового тока $I_{ср.ц}$ с ростом L .

Очевидно, что самый оптимальный способ, при котором будет минимальная загрузка силового трансформатора, – это метод СРН при раздельном управлении. Но, с другой стороны, для «поддержания» электрической сети по $\delta U_{(+)}$ лучшим образом проявил себя способ управления при сравнении сигналов метода РМЭ. Следовательно, электромагнитная совмести-

мость (ЭМС) такого экскаватора будет лучше.

Проведем сравнительный анализ гармонического состава тока и напряжения в сети при работе системы ТП-Д с ФКУ и без ФКУ. Для этого в качестве примера питание экскаватора будет осуществляться по линии длиной 12,5 км, а ФКУ управляться методом РМЭ. Результаты показателей качества ЭЭ (ПКЭЭ) представлены в **таблице**. Для оценки уровня искажений в ней приводятся значения, нормируемые согласно [2], а также ненормируемые.

При работе системы ТП-Д с ФКУ происходит зна-

чительное снижение уровня 5 и 7 гармоники напряжения по сравнению с отсутствующим ФКУ, а значения не выходят за пределы, установленные в [2]. Суммарный коэффициент K_U снизился почти в 3 раза и не превышает предельно допустимого значения 8%.

Отрицательное ОН снизилось также почти в 3 раза, а положительное ОН при использовании ФКУ достигает величины менее 5%. Оба показателя соответствуют допустимой величине 10%. Кратковременная доза фликера P_{st} в обоих случаях превышает допустимые значения.

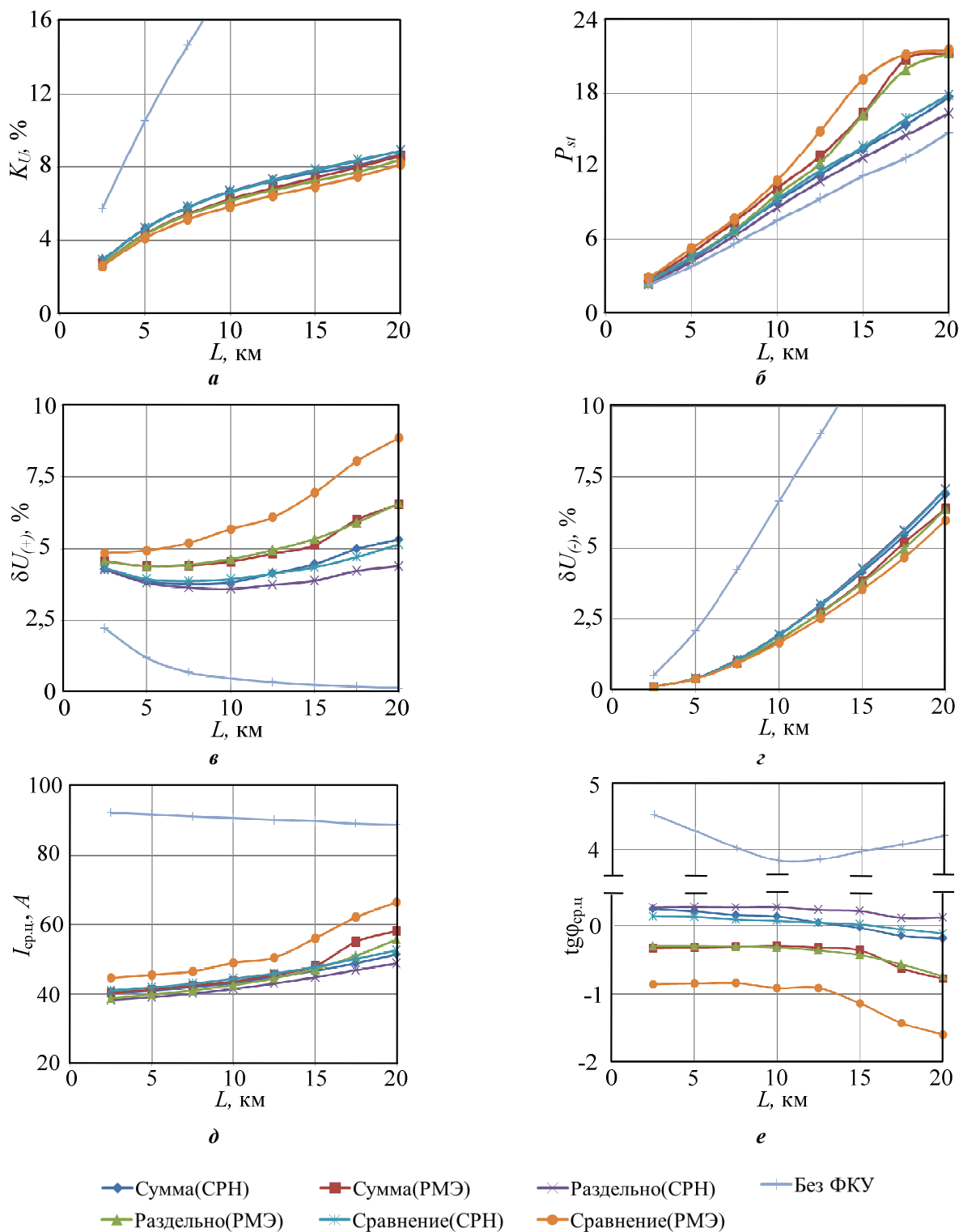


Рис. 10. Зависимости показателей ПКЭЭ и энергетических показателей экскаватора от длины питающей линии

Анализ гармонического состава тока и напряжения

	I_1, A	$I_{с\kappa\text{в}}, A$	ПКЭЭ								
			Нормируемые						Ненормируемые		
			$K_U, \%$	$K_{U(5)}, \%$	$K_{U(7)}, \%$	$\delta U_{(+)}, \%$	$\delta U_{(-)}, \%$	P_{st}	$K_I, \%$	$K_{I(5)}, \%$	$K_{I(7)}, \%$
ГОСТ	–	–	5(8)	4	3	10	10	1,38	-	-	-
РМЭ	17,1	3,83	6,85	0,18	0,27	4,82	2,73	12,86	22,29	3,10	2,67
Без ФКУ	92,5	10	21,84	3,73	4,04	0,35	9,02	9,35	10,81	5,48	3,14

Ненормируемые в [2] коэффициенты 5 и 7 гармоники тока при использовании ФКУ снизились соответственно в 1,76 и 1,17 раза. Следует отметить, что суммарный коэффициент несинусоидальности тока K_I , наоборот, вырос. Это связано с тем, что при включении ФКУ значительно уменьшается уровень первой гармоники, которая связана с коэффициентом K_I согласно формуле [9]:

$$K_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} I_{(n)}^2}}{I_{(1)}} = \frac{I_{с\kappa\text{в}}}{I_{(1)}}, \quad (10)$$

где $I_{с\kappa\text{в}}$ – среднеквадратичная сумма действующих значений высших гармоник тока, А; $I_{(1)}$ – действующее значение тока первой гармоники, А.

Следовательно, в нашем случае более рационально измерять не удельный вес гармонических составляющих, а их абсолютную величину ($I_{с\kappa\text{в}}$). Для этой цели с помощью разработанной модели произведена оценка значений $I_{с\kappa\text{в}}$ при отсутствии и наличии ФКУ, которые составили 10 и 3,83 А соответственно. То есть уровень гармоник тока снизился более чем в 2,5 раза.

ВЫВОДЫ

1. Разработана имитационная модель главных электроприводов экскаватора ЭКГ – 12К, позволяющая использовать реальные циклы экскавации и проводить оценку показателей качества и энергетики.

2. Доказана адекватность представленной модели путем сравнения реальных и модельных осциллограмм токов и напряжений двигателей.

3. Проведен анализ построения структур методов и способов управления экскаваторным ФКУ.

4. Проведен анализ методов управления по быстрейшему включению ступеней ФКУ. По результатам анализа выявлено, что метод ОСТ является менее предпочтительным. Время срабатывания ступеней ФКУ при методе СРН фактически не зависит от задания U^*z и длины линии. В методе РМЭ время срабатывания ступеней ФКУ зависит от U^*z . При U^*z менее половины от номинального метод является самым оптимальным.

5. Проведена оценка качества ЭЭ и энергетических показателей экскаватора при работе в цикле. При отсутствии ФКУ все показатели выходят за пределы допустимых значений. Экскаватор будет работать в аварийном режиме. Присутствие ФКУ значительно улучшает качество ЭЭ и при длинной линии только коэф-

фициент несинусоидальности K_U выходит за пределы ГОСТа. С ростом длины линии наименьший показатель $\delta U_{(+)}$ имеет метод РМЭ. Минимальную загрузку сети по среднеквадратичному току имеет метод СРН.

6. Кратковременная доза фликера в точке передачи ЭЭ (точка подключения экскаватора) для всех методов выходит за пределы [2]. Таким образом, не рекомендуется от экскаваторной линии запитывать помещения с потребителями, где предусмотрена зрительная работа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Энергетическая эффективность регулирования в тиристорных и транзисторных электроприводах экскаваторов / Микитченко А.Я., Шевченко А.Н., Бирюков Ю.А., Шестаков П.Р. // Горное оборудование и электромеханика. 2008. №5. С. 24–31.
2. ГОСТ 32144-2013. Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2013-03-25. М.: Стандартинформ, 2014. 20 с.
3. Греков Э.Л., Шевченко А.Н., Филимонов С.И. Исследование методов управления экскаваторным фильтро-компенсирующим устройством // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2014. №1. С. 196–203.
4. Электропривод экскаватора ЭКГ-5 по системе ТП-Д производства ОАО «Рудоавтоматика» / Сафoshин В.В., Микитченко А.Я., Шевченко А.Н., Шоленьков А.Н., Щербак А.В., Шоков М.А. // Горное оборудование и электромеханика. 2009. №4. С. 16–22.
5. Филимонов С.И. Разработка модели двухступенчатого зависимого задатчика интенсивности в программном комплексе MATLAB // Universum: технические науки. 2016. №1(23). С. 2.
6. Шевырев Ю.В. Способы повышения электроэнергетических показателей электротехнических комплексов буровых установок с тиристорным электроприводом постоянного тока // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2004. №6. С. 64–69.
7. Шевырева Н.Ю. Влияние на качество электроэнергии ступенчатого фильтро-компенсирующего устройства при работе буровых установок // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. №1. С. 408–415.
8. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 2000. 252 с.
9. ГОСТ 30804.4.7-2013. Межгосударственный стандарт. Совместимость технических средств электромагнитная. Общее руководство по средствам измерений и измерениям гармоник и интергармоник для систем электроснабжения и подключаемых к ним технических средств. Введ. 2013-03-25. М.: Стандартинформ, 2013. 33 с.

Поступила в редакцию 27 апреля 2017 г.

INFORMATION IN ENGLISH

COMPARISON OF SHOVEL FILTER-COMPENSATING DEVICE CONTROL ALGORITHMS IN THE “THYRISTOR CONVERTER-MOTOR” ELECTRIC DRIVE SYSTEM

Eduard L. Grekov

Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Department of automated electric drive, electromechanical and electrical, Orenburg State University, Orenburg, Russia.

Sergey I. Filimonov S.I.

Assistant Professor, Shukhov Belgorod state technological university, Belgorod, Russia.

Modern shovel electric drive designed as “thyristor converter-motor” (TCM) system should be used along with a filter-compensating device (FCD). On the basis on the practical experience it was concluded that in terms of the applied scheme simplicity and reliability, step type FCD showed the best results on the quarry shovels. Usage of FCD provides the necessary quality of the electric energy and the power factor $\cos \varphi = 0.33 \div 0$. The imitation model in the complex *Matlab/Simulink* for the FCD control algorithms study and their influence on the electric energy quality measures was developed considering digital control system features realization and power part of the electric drives operation. The real graphs of the shovel EKG-12K operation were used as setting and disturbing signals. To confirm the relevance, real-life graphs were compared with the modeling results. Three main methods of the FCD activation control signal development were studied: by the electric drives reactive power, by the feedback signals of armature current and voltage regulators. Because the shovel electric drives are separated between the two power transformers with their own FCD, for each method there were suggested three ways to control them: separated and joint stage inclusion, by the maximal or the summary signal. Relationships for the task level and the length of the power line 6 kV for the time changing of the stage inclusion were received. The electric energy quality and energy measures were studied. Their dependence on the length of the power line was obtained.

Keywords: Filter-compensating device, dredge electric drive, thyristor converter.

REFERENCES

1. Mikitchenko A.Y., Shevchenko A.N., Biryukov U.A., Shestakov P.R. Energy efficiency regulation of thyristor and transistor drives of excavator. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika* [Mining equipment and electromechanics], 2008, no. 5, pp. 24–31. (In Russian)
2. State Standard 32144-2013. Interstate standard. Electric Energy. Compatibility of technical equipment. Electric power quality standards in public power-supply systems. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 20 p. (In Russian).
3. Grekov E.L., Shevchenko A.N., Filimonov S.I. Dredge filter-compensating device operating method research. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova* [Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov], 2014, no. 1, pp. 196–203. (In Russian)
4. Safoshin V.V., Mikitchenko A.Ya., Shevchenko A.N., Sholenikov A.N., Sherbakov A.V., Shokov M.A. Electric drive for excavator EKG-5 on the basis of thyristor converter - motor system produced by “Rudoavtomatika”. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika* [Mining equipment and electromechanics], 2009, no. 4, pp. 16–22. (In Russian)
5. Filimonov S.I. Two-stage dependent intensity regulator Model development in MATLAB. *Universum: tehnicheskie nauki* [Universum: technical science], 2016, no. 1(23), pp. 2. (In Russian)
6. Shevyrev Yu. V. Ways of increasing electric power indices of complex drilling rigs. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Geologiya i razvedka*. [News of higher educational institutions. Geology and exploration.], 2004, no. 6, pp. 64–69. (In Russian)
7. Shevyreva N.Yu. Influence of multistage filter compensation device on energy quality during the operation of drill rigs with variable – frequency electric drive. *Gornyy informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal)* [Mining information-analytical Bulletin (scientific and technical journal)], 2015, no.1, pp. 408–415.
8. Zhezhelenko I.V., Saenko Yu.L. *Pokazateli kachestva elektroenergii i ih control na promyshlennnykh predpriyatiyakh* [Power Quality Ratings and Their Monitoring in Industrial Enterprises], 3rd ed., rev. and ext. Moscow, Energoatomisdat Publ., 2000. 252 p. (In Russian)
9. State Standard 30804.4.7-2013. Interstate standard. Compatibility of technical equipment. General guide on harmonics and interharmonics measurement and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto. Moscow, Standartinform Publ., 2013. 33 p. (In Russian)

Греков Э.Л., Филимонов С.И. Сравнение алгоритмов управления экскаваторным фильтрокомпенсирующим устройством в системе электропривода «тиристорный преобразователь-двигатель» // Электротехнические системы и комплексы. 2017. № 2 (35). С. 25–34. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2\(35\)-25-34](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2(35)-25-34)

Grekov E.L., Filimonov S.I. Comparison of Shovel Filter-Compensating Device Control Algorithms in the “Thyristor Converter-motor” Electric Drive System. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2017, no. 2 (35), pp. 25–34. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2\(35\)-25-34](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-2(35)-25-34)