

Шевченко А. Н., канд. техн. наук
ОАО «Рудоавтоматика» г. Железнодорожск
Греков Э. Л., канд. техн. наук, доц.
Оренбургский государственный университет
Филимонов С. И., ст. преп.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ ЭКСКАВАТОРНЫМ ФИЛЬТРО – КОМПЕНСИРУЮЩИМ УСТРОЙСТВОМ

schev@list.ru

Проводится исследование методов управления фильтро - компенсирующим устройством по суммарному току и суммарной реактивной мощности всех электроприводов, обеспечивая минимальный среднецикловой ток и максимальный среднецикловой $\cos\phi$. Разработана имитационная энергетическая модель. Предложена методика выбора уставок включения ступеней фильтро-компенсирующего устройства.

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

Как известно [1], выпрямительно – преобразовательная нагрузка, без компенсации реактивной мощности имеет достаточно низкий $\cos\phi$. К такой нагрузке относятся низковольтные комплектные устройства (НКУ) карьерных экскаваторов, выполненные по системе тиристорный преобразователь – двигатель (ТП – Д). Форма тока, потребляемого ими из сети, искажена, то есть в сети появляются высшие гармоники. Наибольший вес имеют гармонические составляющие пятого ($v=5$) и седьмого ($v=7$) порядков. Они составляют соответственно 20% и 14.29% [2] от уровня первой гармоники. Возникающие высшие гармоники тока приводят к увеличению коэффициента искажения синусоидальности напряжения $K_{исн}$ [3]. Как следствие, у потребителя не будет обеспечена надежная электромагнитная совместимость, что приведет к его неспособности работать рядом с таким источником помех. Согласно ГОСТ 13109 коэффициент $K_{исн}$ не должен в норме превышать 5%. Кроме того, исходя из технического задания (ТЗ) при проектировании электрической части карьерных экскаваторов, необходимо обеспечивать $\cos\phi = 0.95 \div 1$.

На сегодняшний день существует большое количество способов и устройств для улучшения качества электрической сети и компенсации реактивной мощности (активные и пассивные фильтры, статические компенсаторы, синхронные компенсаторы и т.д.). Режим работы электрических экскаваторов предъявляет особые требования к электрооборудованию. Эти машины работают с резкопеременной нагрузкой, поэтому для компенсации реактивной мощности и фильтрации высших гармоник необходимы активные устройства с высокой надежностью.

В ОАО «Рудоавтоматика» в НКУ серии

КЭР используются для таких целей фильтро – компенсирующие устройства (ФКУ). Для примера на рис. 1 представлена однолинейная схема подключения ступеней ФКУ и главных приводов экскаватора ЭШ – 6/45. Питание экскаватора осуществляется от двух трансформаторов Т1 и Т2 (рис. 1) по схемам «звезда-звезда» и «треугольник - звезда». К вторичным обмоткам подключается по три ТП, управляющих главными приводами и ФКУ. Каждый из преобразователей работает параллельно и выполнен по шестипульсной схеме. Вторичные напряжения трансформаторов сдвинуты друг относительно друга на 30° . Соответственно такая схема включения двух преобразователей представляет собой, со стороны питающей сети, эквивалентно – двенадцатипульсную.

ФКУ состоит из двух частей. Каждая часть имеет две подключаемые через тиристорные ключи (ТК) ступени и одну неотключаемую «глухую» ступень. Неотключаемая ступень облегчает процесс включения силового трансформатора без нагрузки и на несколько периодов обеспечивает поддержание собственной сети при отключениях внешней [3]. На емкостях и реакторах этой ступени выполнен фильтр, настроенный на пятую ($v=5$) гармонику. Фильтры подключаемых ступеней настраиваются на пятую ($v=5$) и седьмую ($v=7$) гармоники. Уровень пятой гармоники выше, поэтому доля мощности ступени, приходящейся на нее больше, чем на седьмую гармонику. В сумме они дают реактивную мощность подключаемой ступени. Например, на экскаваторе ЭШ – 6/45 «глухая» ступень имеет мощность 200 кВАр, а две подключаемые ступени по 300 кВАр, причем 200 кВАр приходится на $v=5$, а 100 кВАр на $v=7$.

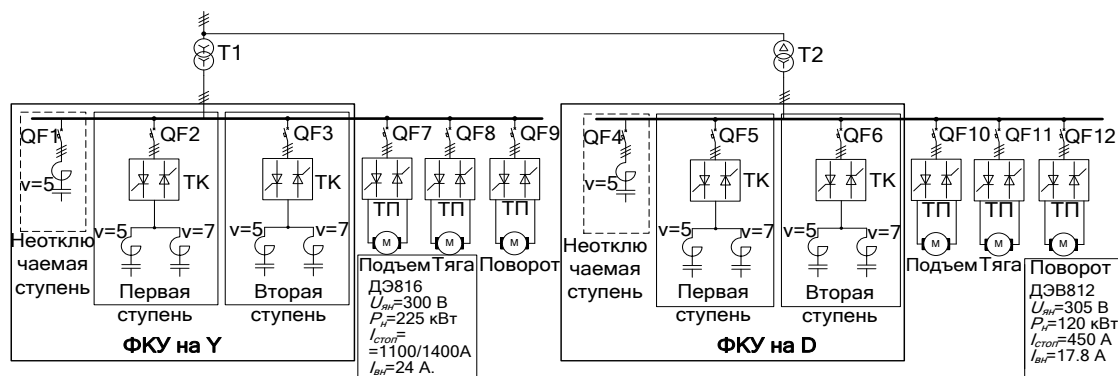


Рис. 1. Однолинейная схема подключения главных приводов и ступеней ФКУ экскаватора ЭШ – 6/45

В данной статье приведены результаты исследований методов включения ступеней ФКУ в зависимости от режимов работы электроприводов. Для этого была разработана имитационная модель энергетических процессов экскаватора ЭШ – 6/45 в программном комплексе Matlab (рис. 2). Данная модель представлена в виде блоков, которые позволяют определять среднецикловые значения полной, активной и реактив-

ной мощности, $\cos\varphi$, тока в питающей линии и удельные значения энергопотребления на единицу продукции экскаватором. Управляемые ФКУ представлены двумя блоками «ФКУ на У» и «ФКУ на D». Расчет всех среднецикловых значений в модели производится по уравнениям в интегральной форме. Например, вычисление среднециклового $\cos\varphi$ производится по формуле:

$$\cos\varphi_{ср.ц} = \cos\left(\arctg\left[\frac{\int_0^T Q_{экск.мгн}(t) \cdot dt}{\int_0^T P_{экск.мгн}(t) \cdot dt}\right]\right), \quad (1)$$

где $Q_{экск.мгн}$ и $P_{экск.мгн}$ - потребляемая мгновенная реактивная и активная мощность экскаватора.

Для упрощения процессов вычисления в данную модель вносятся линеаризованные диаграммы относительных значений токов якоря $I_{я}^* = I_{я} / I_{стоп}$, возбуждения $I_{в}^* = I_{в} / I_{нн}$ и напряжений $U_{я}^* = U_{я} / U_{ян}$ главных приводов при работе экскаватора в цикле. Диаграммы построены по реальным осциллограммам тока и напряжения (рис. 3). Цикл экскавации состоит из следующих временных промежутков: 0-9 сек – копание с максимальным усилием на приводе тяги; 9-24 сек – поворот на разгрузку, с одновременным поднятием (привод подъема) и ускоренным отводом ковша от платформы; 24-26 сек – разгрузка; 27-41.5 сек – поворот в забой с одновременным опусканием и установкой ковша к месту копания; 41.5-42 сек – ковш на земле (подготовка к следующему циклу).

В реальном электроприводе имеется возможность использовать для управления ступенями ФКУ обратные связи по току (ОСТ) и обратные связи по напряжению (ОСН). Отсюда можно реализовать два метода управления ФКУ: по суммарному току $|\sum I_{я}|$ и суммарной реактивной мощности $\sum Q_i$ всех приводов, подключенных к одному трансформатору.

Проведем исследование метода управления ФКУ по суммарному модулю тока всех

приводов $|\sum I_{я}|$, подключенных к одному трансформатору.

Одной из сложностей реализации данного метода управления заключается в том, что при работе ТП ток $I_{я}$ является пульсирующим, поэтому для правильного срабатывания уставок по $|\sum I_{я}|$ возникает необходимость ставить дополнительные фильтры, например фильтр Баттерворта, настроенный на частоту меньше 300 Гц. Стоит отметить, что в данном методе происходит оценка реактивной мощности упрощенно, что не всегда отражает ее действительное значение. На самом деле реактивную мощность ТП будет потреблять только тогда, когда двигатель находится в режиме короткого замыкания (КЗ). В это время полезная мощность практически отсутствует и ток $I_{я}$ максимальный. Если мощность ступеней ФКУ соизмерима с потребляемой реактивной мощностью, то произойдет ее полная компенсация. То есть индуктивный ток I_L в первичной сети компенсируется емкостным током I_C ФКУ.

Как только привод начинает работать в режиме, отличном от режима КЗ, то появляется полезная мощность [4]:

$$P = M \cdot \omega, \quad (2)$$

С ростом частоты вращения ω полезная мощность P будет расти, а величина Q уменьшаться. Это объясняется тем, что реактивная мощность зависит от угла отпирания тиристорov [1]. Если

в этот момент времени, как и в режиме КЗ, включатся все ступени ФКУ, это приведет к пе-

рекомпенсации реактивной мощности. Это очевидный недостаток данного метода управления.

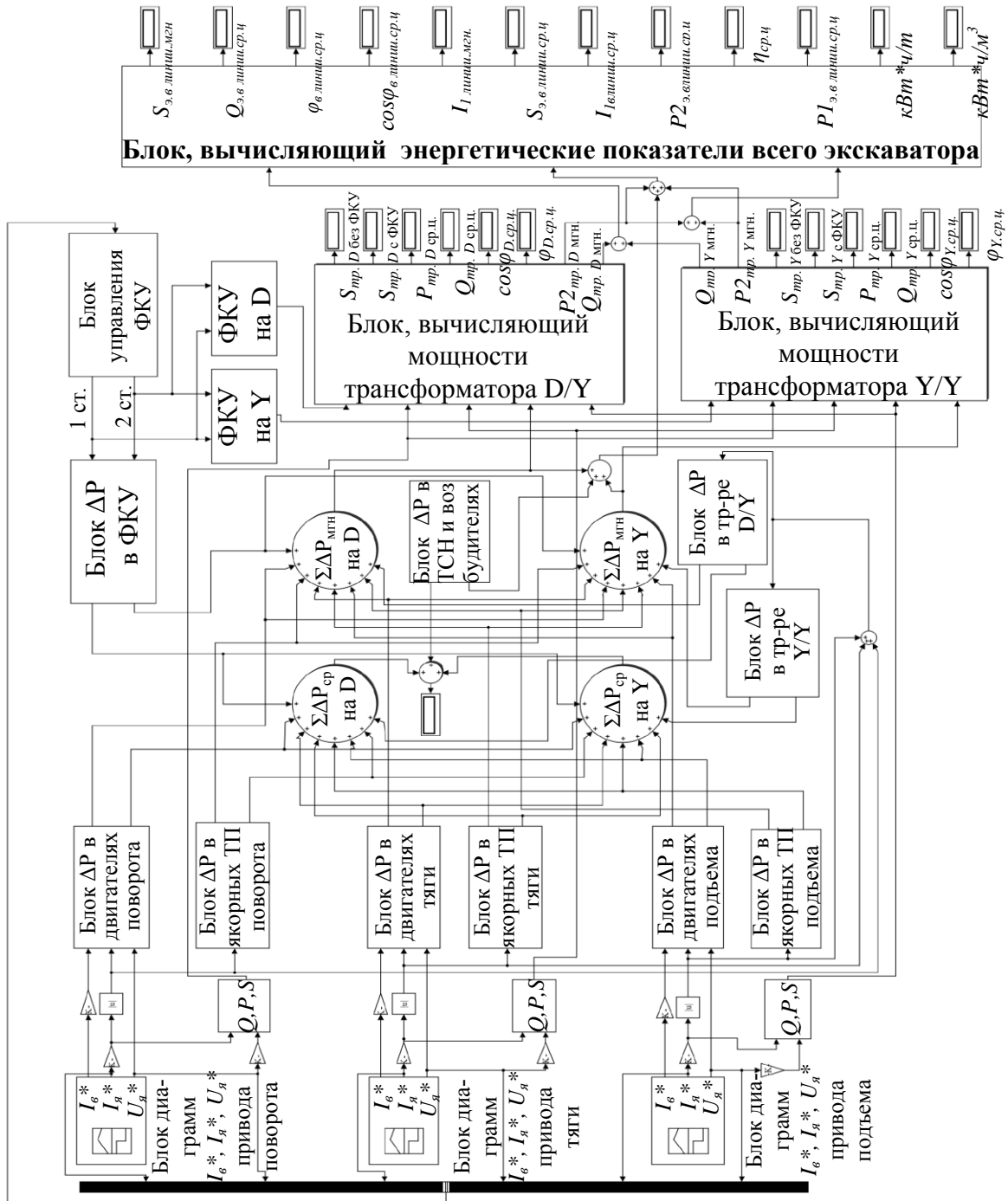


Рис. 2. Имитационная модель энергетических процессов экскаватора ЭШ – 6/45

Перейдем к исследованию данного способа управления. Для этого в разработанной модели (рис. 2), в «Блок управления ФКУ» подключаются ОСТ от каждого привода. Определим, при каких уставках ФКУ среднецикловой $\cos\varphi_{ср.ч}$ будет равен $0.95 \div 1$. Примем целесообразный диапазон изменения уставки срабатывания первой ступени $I_{уст1}$ в пределах от 0 до 1200 А $|\sum I_{я}|$, а второй ступени $I_{уст2}$ от 0 до 2200А. Чтобы проследить влияние нагрузки электроприводов данное исследование и все последую-

щие, приведенные в данной статье, проводятся для трех режимов работы: 80% загрузки приводов ($0.8 \cdot I_{я}$), 100% загрузки приводов ($1.0 \cdot I_{я}$) и 120% загрузки приводов ($1.2 \cdot I_{я}$). При исследовании во втором и третьем режимах уставка второй ступени менялась до 1600 А предложенного диапазона, так как чем выше ток приводов, а следовательно и связанная с ним реактивная мощность, тем раньше необходимо включать ступени ФКУ.

Результаты вычислений $\cos\varphi_{ср.ч}$ записыва-

ются со счетчика « $\cos\varphi_{\text{в.линии.ср.ц}}$ » (рис.2). По полученным результатам строятся зависимости $\cos\varphi_{\text{ср.ц}} = f(I_{\text{уст1}}; I_{\text{уст2}})$, представленные на рис. 4. При исследовании в модель закладывались

все предложенные комбинации уставок, но интерес представляют только тот набор, при котором вторая ступень включается позже первой или вместе с ней.

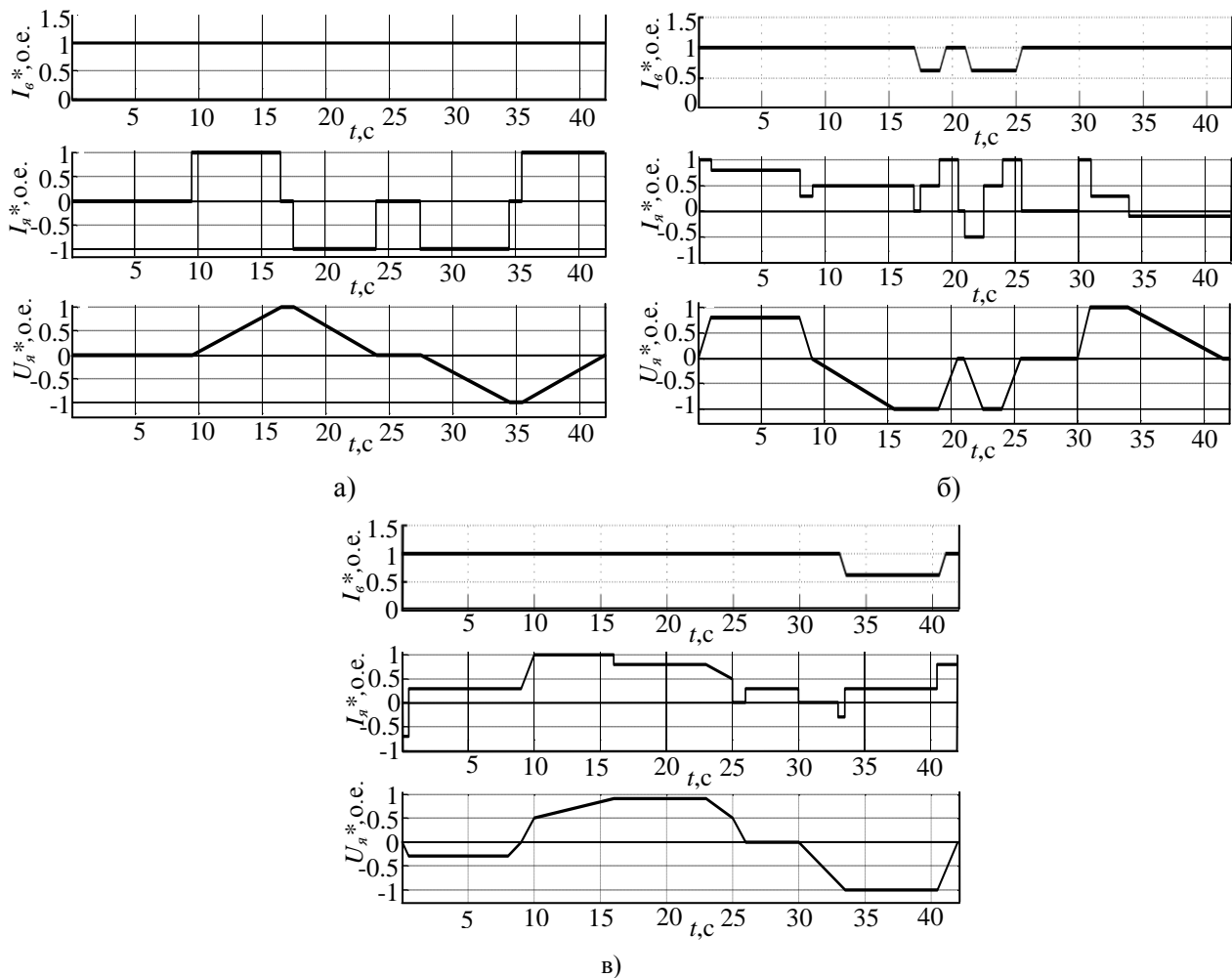
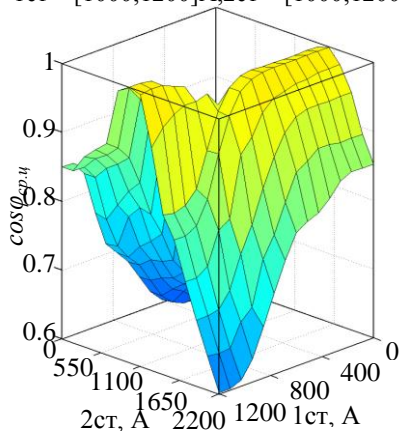


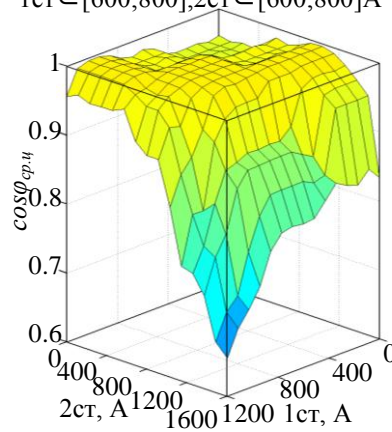
Рис. 3. Диаграммы токов и напряжения привода а) поворота, б) тяги, в) подъема

$\cos\varphi_{\text{ср.ц}}=1$, если
 1ст $\in [0;600]$ А, 2ст $\in [1400;1600]$ А
 1ст $\in [1000;1200]$ А, 2ст $\in [1000;1200]$ А



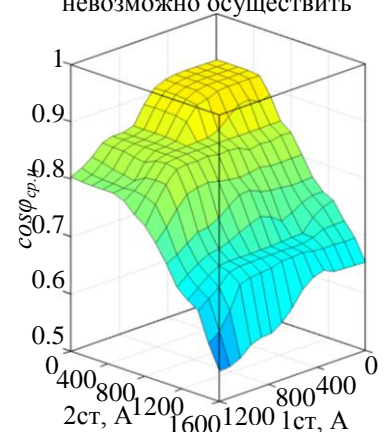
а)

$\cos\varphi_{\text{ср.ц}}=1$, если
 1ст $\in [0;800]$ А, 2ст = 1000 А
 1ст $\in [600;800]$, 2ст $\in [600;800]$ А



б)

$\cos\varphi_{\text{ср.ц}}=1$
 невозможно осуществить



в)

Рис. 4. Зависимости среднециклового $\cos\varphi_{\text{ср.ц}}$ от момента включения ступеней ФКУ при управлении по суммарному току приводов, если а) $0.8 \cdot I_{\text{я}}$, б) $1.0 \cdot I_{\text{я}}$, в) $1.2 \cdot I_{\text{я}}$

На полученных зависимостях видно, что в номинальном режиме (рис. 4,б) для получения $\cos\varphi_{ср.ц} = 1$ необходимо, чтобы $1ст \in [0;800]$ А, а $2ст = 1000$ А, или же $1ст \in [600;800]$ А, а $2ст \in [600;800]$ А. Помимо этого, можно получить значение $\cos\varphi_{ср.ц}$ не менее 0.95 если $1ст \in [0;800]$ А, а $2ст \in [0;1000]$ А. То есть в номинальном режиме существует достаточно много вариантов уставок, которые будут удовлетворять условию $\cos\varphi_{ср.ц} = 0.95 \div 1$.

Рассмотрим теперь зависимость, представленную на рис. 4, а. Здесь видно, что при снижении $I_я$ на 20% количество вариантов уставок, удовлетворяющих условию $\cos\varphi_{ср.ц} = 0.95 \div 1$ снизилось. Для получения $\cos\varphi_{ср.ц} = 1$ необходимо, чтобы $1ст \in [0;600]$ А, а $2ст \in [1400;1600]$ А, или же $1ст \in [1000;1200]$ А, а $2ст \in [1000;1200]$ А. То есть, по сравнению с предыдущим случаем вторая ступень ФКУ явно должна включаться позже.

И наконец, рассмотрим последний режим, при увеличении $I_я$ на 20%. На представленной

зависимости видно, что при любых уставках условие $\cos\varphi_{ср.ц} = 0.95 \div 1$ выполнено быть не может. В этом случае необходимо увеличивать мощность ступеней ФКУ.

Как видно существует неопределенность в выборе уставок при изменении режима работы. Поэтому использовать критерий $\cos\varphi_{ср.ц} = 0.95 \div 1$ рекомендуется только при выборе минимально необходимой мощности ФКУ на этапе проектирования.

Теперь проследим, при каких уставках ФКУ среднецикловое значение тока $I_{ср.ц}$ в питающей линии будет минимальным. В отличие от предыдущего исследования здесь уставки второй ступени для первого и третьего режимов изменялись до 1900 А. Результаты вычислений $I_{ср.ц}$ записываются со счетчика « $I_{1в.линии.ср.ц}$ » (рис. 2). По полученным результатам строятся зависимости $I_{ср.ц} = f(I_{уем1}; I_{уем2})$, представленные на рис. 5.

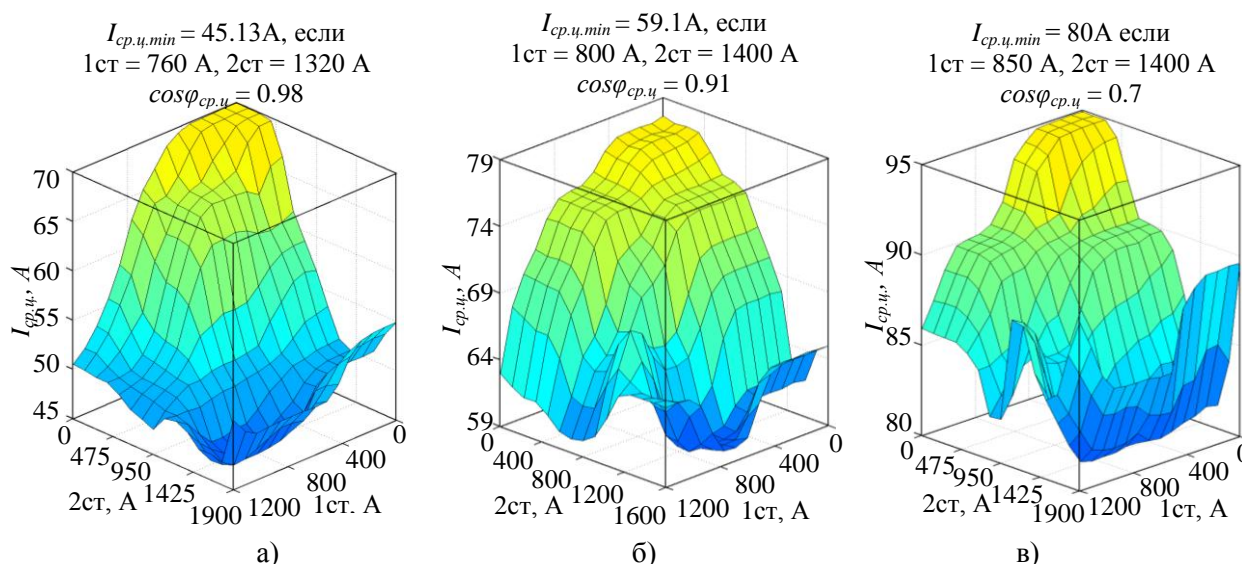


Рис. 5. Зависимости среднециклового тока $I_{ср.ц}$ от момента включения ступеней ФКУ при управлении по суммарному току приводов, если а) $0.8 \cdot I_я$, б) $1.0 \cdot I_я$, в) $1.2 \cdot I_я$

Найдем на представленных зависимостях минимум их функций. Для иллюстрации на рис. 5, а это значение соответствует 45.13 А, на рис. 5,б – 59.1 А, а на рис. 5,в – 80 А. Так же в этих точках был произведен расчет $\cos\varphi_{ср.ц}$, который соответственно равен 0.98, 0.91, 0.7. Для первого режима комбинация уставок составила 1 ст = 760 А, 2 ст = 1320 А, для второго режима 1 ст = 800 А, 2 ст = 1400 А, а для третьего для режима 1 ст = 850 А, 2 ст = 1400 А. Для всех трех режимов получились разные наборы уставок. То есть, при управлении по току, используя критерий минимума $I_{ср.ц}$, появляется зависимость набора уставок от нагрузки приводов. Кроме этого, по-

лученные значения $\cos\varphi_{ср.ц}$ являются удовлетворительными только для одного режима, что не соответствует требованию ТЗ. С другой стороны, обеспечивая при управлении минимальный ток, не придется завышать мощность силовых трансформаторов, сечения проводников и т.д. Поэтому, используя данный способ управления, рекомендуется экспериментально выбирать уставки по минимуму $I_{ср.ц}$, а при низких значениях $\cos\varphi_{ср.ц}$ необходимо увеличивать мощность ФКУ.

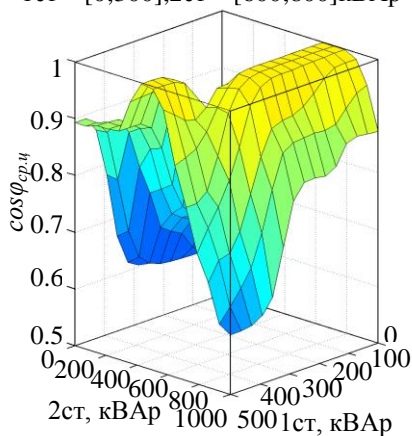
Как видно из рис. 4 и 5 оптимальные значения уставок по максимуму $\cos\varphi_{ср.ц}$ и минимуму $I_{ср.ц}$ не совпадают. Это связано с тем, что рас-

смастриваемое ФКУ состоит только из двух подключаемых ступеней и для обеспечения $\cos\varphi_{ср.ц} = 0.95-1$ необходимо делать перекомпенсацию на менее загруженных участках цикла. Соответственно, мгновенные значения тока на этих участках возрастут и $I_{ср.ц}$ окажется не минимальным.

Проведем исследование метода управления ФКУ по суммарной реактивной мощности $\sum Q_i$ электроприводов. Для этого в разработанной модели к «Блоку управления ФКУ» подключаются ОСТ и ОСН от каждого привода. В блоке происходит вычисление Q каждого привода, которые затем суммируются.

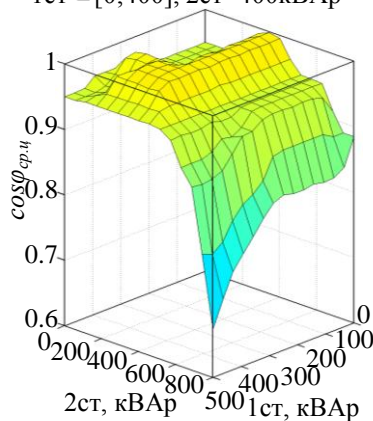
Сначала проследим, при каких уставках

$\cos\varphi_{ср.ц}=1$, если
 1ст $\in [400;500]$, 2ст $\in [400;500]$ кВАр
 1ст $\in [0;300]$, 2ст $\in [600;800]$ кВАр



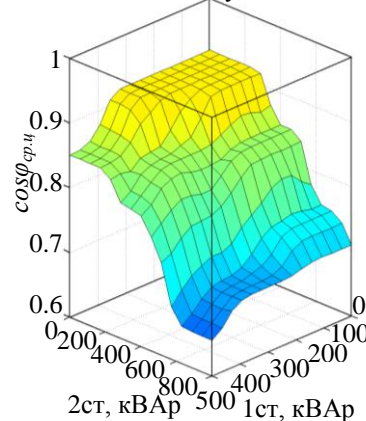
а)

$\cos\varphi_{ср.ц}=1$ если
 1ст $\in [0;400]$, 2ст = 400 кВАр



б)

$\cos\varphi_{ср.ц}=1$
 невозможно осуществить



в)

Рис. 6. Зависимости среднециклового $\cos\varphi_{ср.ц}$ от момента включения ступеней ФКУ при управлении по суммарной реактивной мощности приводов, если а) $0.8 \cdot I_{я}$, б) $1.0 \cdot I_{я}$, в) $1.2 \cdot I_{я}$

Полученные зависимости свидетельствуют о том, что в номинальном режиме (рис. 6, б) для получения $\cos\varphi_{ср.ц} = 1$ необходимо, чтобы 1ст $\in [100;400]$ кВАр, а 2ст = 400 кВАр. Помимо этого, можно получить значение $\cos\varphi_{ср.ц}$ не менее 0.95 если 1ст $\in [0;300]$ кВАр, а 2ст $\in [0;300]$ кВАр, или же 1ст $\in [0;300]$ кВАр, а 2ст $\in [400;500]$ кВАр. То есть, как и при исследовании предыдущего способа управления, в номинальном режиме существует достаточно много вариантов уставок, которые будут удовлетворять условию $\cos\varphi_{ср.ц} = 0.95 \div 1$.

По рис. 6, а видно, что при снижении $I_{я}$ на 20% количество вариантов уставок, удовлетворяющих условию $\cos\varphi_{ср.ц} = 0.95 \div 1$ снизилось. Для получения $\cos\varphi_{ср.ц} = 1$ необходимо, чтобы 1ст $\in [400;500]$ кВАр, а 2ст $\in [400;500]$ кВАр, или же 1ст $\in [0;300]$ кВАр, а 2ст $\in [600;800]$ кВАр. Таким образом, и здесь по сравнению с предыдущим режимом вторая ступень ФКУ

ФКУ среднециклового $\cos\varphi_{ср.ц} = 0.95 \div 1$. Во всех режимах уставка срабатывания первой ступени Q_{ycm1} изменяется в пределах от 0 до 500 кВАр $\sum Q_i$. Для первого режима изменение уставки второй ступени Q_{ycm2} происходит от 0 до 1000 кВАр, а во втором и третьем режимах - от 0 до 800 кВАр. Результаты вычислений $\cos\varphi_{ср.ц}$ записываются с того же счетчика, который использовался в предыдущем исследовании. По полученным результатам строятся зависимости $\cos\varphi_{ср.ц} = f(Q_{ycm1}; Q_{ycm2})$, представленные на рис. 6.

должна включаться позже.

Рассматривая зависимость на рис 6, в видно, что при любых уставках условие $\cos\varphi_{ср.ц} = 0.95 \div 1$ не может быть выполнено. То есть и в этом случае необходимо увеличивать мощность ступеней ФКУ.

Далее рассмотрим, при каких уставках ФКУ среднециклового значение тока $I_{ср.ц}$ в питающей линии будет минимальным. Здесь для всех режимов изменение уставок первой ступени происходит, как и в предыдущем случае. Изменение уставок второй ступени в третьем режиме осуществляется в пределе от 0 до 1000 кВАр, а в первом и втором режимах – от 0 до 800 кВАр. Результаты вычислений $I_{ср.ц}$ фиксируются со счетчика « $I_{влинш.ср.ц}$ » (рис. 2). По полученным результатам строятся зависимости $I_{ср.ц} = f(Q_{ycm1}; Q_{ycm2})$, представленные на рис. 7.

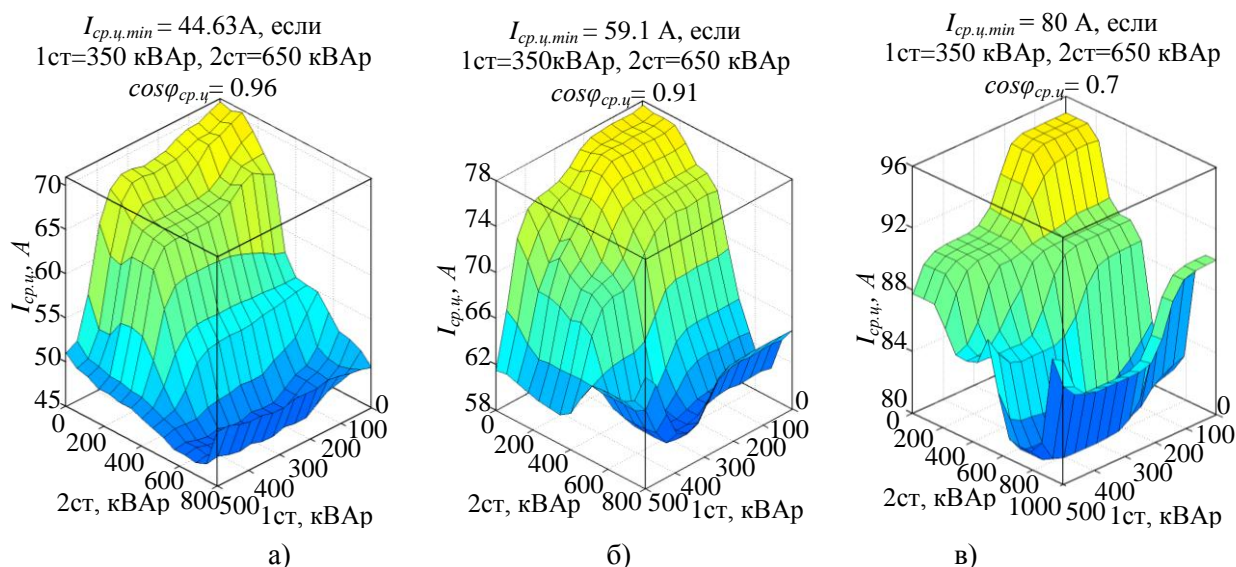


Рис. 7. Зависимости среднециклового тока $I_{cp,ц}$ от момента включения ступеней ФКУ при управлении по суммарной реактивной мощности, если а) $0.8 \cdot I_{я}$, б) $1.0 \cdot I_{я}$, в) $1.2 \cdot I_{я}$

Из полученных зависимостей видно, что минимумы функций находятся при уставке первой ступени равной 350 кВАр и уставке второй ступени 650 кВАр. Для всех трех режимов значения минимальных токов составляет соответственно 44.63 А, 59.1 А и 80 А. В этих же точках был произведен расчет $\cos\phi_{cp,ц}$ который соответственно составил 0.96, 0.91, 0.7. Данные значения практически полностью совпадают с результатами при исследовании предыдущего метода управления, только теперь независимо от режима работы минимальный средний ток получился только при единственной комбинации уставок. Соответственно здесь критерий минимума $I_{cp,ц}$ является более привлекательным, чем по максимуму $\cos\phi_{cp,ц}$, а при управлении по $\sum Q_i$ выбор уставок включения ФКУ однозначен. Действительно, величина полученной выше уставки первой ступени представляет собой сумму мощностей уже включенной ступени и половины подключаемой. Вторая уставка так же представляет собой сумму мощностей уже включенных ступеней и половины подключаемой, то есть:

$$Q_{уст.i} = \sum_{j=0}^{i-1} Q_{вкл.j} + \frac{Q_{смынени.i}}{2}. \quad (3)$$

Выводы:

Для обеспечения эффективного управления ступенями ФКУ рекомендуется использовать метод оценки реактивной мощности по току и напряжению приводов.

Не зависимо от метода управления ФКУ рекомендуется выбирать уставки по минимуму потерь (минимум $I_{cp,ц}$). При этом если управление происходит по $\sum Q_i$, то уставки следует

выбирать по формуле 3. Если же управление происходит по $\sum I_{я}$, то рекомендуется предварительно настроить уставки согласно следующей формуле:

$$I_{уст.i} = \sum_{j=0}^{i-1} I_{d.вкл.j} + \frac{I_{d.смынени.i}}{2}, \quad (4)$$

где $I_{d.вкл.j}$ - эквивалентный ток уже включенных ступеней, А; $I_{d.смынени.i}$ - эквивалентный ток подключаемой ступени, А.

Далее на этапе наладки ФКУ уставки следует выбирать методом подбора, ориентируясь на минимум реактивной энергии, например, за сутки.

Не рекомендуется производить выбор уставок по максимуму $\cos\phi_{cp,ц}$, так как можно получить завышенный $I_{cp,ц}$, что в свою очередь приведет к увеличению установленной мощности трансформатора, завышению сечений проводников и т.д. Этот способ можно использовать на этапе проектирования для оценки минимальной мощности ФКУ. Для нахождения эквивалентного тока рекомендуется воспользоваться следующей формулой реактивной мощности [5]:

$$Q = 3 \cdot I_{L\phi} \cdot U_{\phi} = 3 \cdot 0.82 \cdot I_d \cdot U_{\phi}, \quad (5)$$

где $I_{L\phi} = 0.82 \cdot I_d$ - фазный переменный и эквивалентный ток, А; U_{ϕ} - фазное напряжение питающей сети; 0.82 - коэффициент мостовой трехфазной схемы выпрямления.

Откуда эквивалентный ток подключаемой ступени ФКУ:

$$I_{d.смынени.i} = \frac{Q_{смынени.i}}{3 \cdot 0.82 \cdot U_{\phi}}. \quad (6)$$

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Супронович Г. Улучшение коэффициента мощности преобразовательных установок: Пер. с польск. М.: Изд. Энергоатомиздат, 1985. 136 с.
2. Бурков А.Т. Электронная техника и преобразователи: учеб. для вузов ж.-д. трансп. М.: Транспорт, 1999. 464 с.
3. Об электромагнитной совместимости тиристорных электроприводов экскаватора ЭКГ – 10 с питающей сетью / А.Я. Микитченко, А.Н. Шевченко, Д.Р. Шевченко, Э.Л. Греков, С.И. Филимонов // Энергетика: состояние, проблемы, перспективы: Всерос. науч.- технич. конф., (Оренбург, сентябрь 2010 г.), Оренбург: Изд-во ОГУ, 2010. – С. 238 – 243.
4. Виноградов А.А., Нестеров А.А., Прасол Д.А., Тарсаидзе А.Г. Электротехника и электроника: учебное пособие. Белгород: из-во. БГТУ, 2009. 158 с.
5. Прасол Д.А., Щербинин И.А. и др. Общая электротехника и электроника: методические указания к выполнению лабораторных работ для студентов электрических и неэлектрических специальностей. Белгород: из-во. БГТУ, 2012. 48 с.