

УДК 621.314.2

А.С. Плехов<sup>1</sup>, М.Н. Охотников<sup>2</sup>, В.Г. Титов<sup>3</sup>**ЗАДАЧИ ИДЕНТИФИКАЦИИ И ОПТИМИЗАЦИИ  
ПРИ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕМ УПРАВЛЕНИИ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ  
И АЛГОРИТМЫ ИХ РЕШЕНИЯ**ООО «Энергосбережение»<sup>1</sup>,  
ООО «Развитие»<sup>2</sup>,Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>3</sup>

В целях компенсации реактивной мощности в распределительной сети электроснабжения, питающей электроприводы предприятия, рассматриваются алгоритмы вычислений соотношений углов управления группами вентилях компенсационного выпрямителя в звене постоянного тока электропривода, соотношения между величинами угла управления компенсационным преобразователем и степенью широтно-импульсной модуляции выходного потока энергии инвертора тока. Решаются задачи оптимизации соотношения токов возбуждения в группе синхронных двигателей и относительной загрузки реактивной мощностью двигателей и преобразователей электроприводов. Обсуждаются подходы к реализации микропроцессорных идентифицирующих вычислительных и оптимизирующих устройств. Предложены вычислительные схемы устройств идентификации и оптимизации, которые реализуются на микроконтроллерах посредством программы, написанной на языке С и на языке структурированного текста ST в случае применения программируемых логических контроллеров. В качестве среды для проверки вычислительных разностных схем используется среда имитационного динамического моделирования VenSim.

*Ключевые слова:* компенсация реактивной мощности; энергосберегающее управление электроприводами; управление возбуждением синхронных электродвигателей для компенсации реактивной мощности; регулируемый электропривод с компенсационным выпрямителем в звене постоянного тока преобразователя частоты; относительная нагрузка реактивной мощностью преобразователей электроприводов; алгоритмы вычислений; алгоритмы оптимизации.

В [1, 2, 3, 6, 7, 9] показано, что в целях компенсации реактивной мощности (КРМ) в узлах нагрузки систем электроснабжения, питающих электроприводы предприятий, имеются работоспособные технические решения для управления возбуждением синхронных двигателей и преобразователями электроприводов постоянного и переменного тока со свойствами компенсации реактивной мощности. Данная статья посвящена решению задач управления преобразователями, возникающих при использовании этих разработок. В теории управления можно выделить *две основные задачи*: 1) о программировании оптимальных траекторий движения, то есть изменения во времени переменных состояния системы, включающей в наш случай энергетическую и электромеханическую подсистемы; 2) о проектировании автоматических систем, реализующих движение (развитие) по найденным траекториям. Основной особенностью первой задачи является то, что программа управления и программное движение могут быть найдены до осуществления самого движения. Эта задача решается методами оптимального управления. Вторая задача решается в рамках теории автоматического управления объектами, которые являются реализациями технических решений производственных проблем.

Снижение потерь электроэнергии в распределительных сетях до экономически обоснованного уровня является одним из важнейших направлений энергосбережения. Фактически установлено, что существенные изменения потребления мощности и энергии при изменении напряжения слабо связаны с выполнением дополнительной полезной работы. Поэтому оптимизация напряжения в сетях электропотребления посредством КРМ позволяет достичь экономии энергии, большей по сравнению с традиционными энергосберегающими мероприятиями.

Для распределительной сети – системы электроснабжения промышленного предприятия решается задача размещения устройств компенсации реактивной мощности (КУ), а именно, определения координат расположения, состава и величины шунтирующих емкостей и/или реакторов, наряду с другими средствами КРМ.

Электропривод входит как существенная составляющая в единый процесс производства, распределения и использования электрической энергии. Поскольку двигатель не всегда работает в номинальном режиме с максимальной производительностью, то имеется возможность использовать электрооборудование не только для выполнения технологического процесса, но и для генерации реактивной мощности в сеть. Такая возможность много десятилетий используется при эксплуатации синхронных двигателей (СД), способных генерировать реактивную мощность емкостного характера в режиме перевозбуждения в пределах, определенных по условиям температурного режима [1, 2].

Решения этих задач в зависимости от отрасли промышленности, к которой относится предприятие, от загрузки синхронных двигателей активной мощностью и конфигурации сети различны:

- компенсация реактивной мощности с помощью только синхронных двигателей, подключенных в узлах нагрузки;
- КРМ только конденсаторными батареями из-за нецелесообразности использования СД для генерации реактивной мощности;
- распределение требуемой реактивной мощности между двумя этими источниками в различных пропорциях.

Зависимость приведенных затрат от напряжения в распределительной сети электроснабжения промышленного предприятия складывается из потерь мощности в отдельных группах потребителей. Потери мощности в группе потребителей, в свою очередь, зависят от напряжения в узле сети, мощности конкретного потребителя и его нагрузки. В результате оптимизации на множестве значений токов возбуждения каждого из группы синхронных двигателей должны быть найдены такие значения реактивной мощности, генерируемой синхронными двигателями, при которых соотношение величин напряжения и реактивной мощности узла нагрузки будут соответствовать минимуму приведенных затрат. Авторами разработаны алгоритмы управления возбуждением группы СД для обеспечения заданных значений реактивной мощности или напряжения в узле нагрузки [2].

Существенным для практики является аспект не стационарности системы электроснабжения промышленного предприятия на периоде «проектирование – эксплуатация»: реальная система может не соответствовать проекту и исходной информации для расчета КУ. Важным обстоятельством использования компенсирующих конденсаторов в качестве КУ являются факторы, ограничивающие их применение и обуславливающие необходимость установки дополнительного оборудования [4]. В процессе эксплуатации системы электроснабжения изменения в схему часто не вносятся своевременно, что создает предпосылки для применения самонастраивающихся многофункциональных средств компенсации реактивной мощности. Например, частотно регулируемый электропривод с компенсационным выпрямителем в звене постоянного тока преобразователя частоты является таким средством компенсации реактивной мощности, устанавливаемым непосредственно у потребителя [3, 5, 7, 8]. Новые технические решения проблемы КРМ позволяют получить эффект от вновь выявленных факторов.

Стоимость выработанной СД реактивной энергии зависит от его мощности и системы возбуждения. Авторами предложено использовать компенсационный выпрямитель (КВ) для питания обмотки возбуждения СД и предложена методика для определения мощности компенсационного выпрямителя [5]. Для мостовой схемы компенсационного выпрямителя, наиболее приемлемой по пульсациям выпрямленного напряжения, определены внешние характеристики преобразователя и предельные значения углов управления. Генерируемая компенсационным выпрямителем реактивная мощность емкостного характера при питании

выпрямителя непосредственно от сети без согласующего трансформатора может превышать номинальную мощность возбуждения в 2,5–4 раза.

Большинство электроприводов в промышленности и в коммунальном хозяйстве используют асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором. Питание асинхронного двигателя от преобразователя частоты, в частности, двухзвенного (ДПЧ), открывает возможности не только регулирования производительности машины, но и одновременной компенсации реактивной мощности в питающей сети при плавном автоматическом регулировании ее уровня [6]. Возможность уменьшения потребляемой мощности индуктивного характера и генерации в питающую сеть реактивной мощности емкостного характера присущи и другим техническим решениям. Например, матричный преобразователь частоты [7], используемый в частотно-регулируемом электроприводе для регулирования трехфазного напряжения и частоты на обмотках двигателя, обеспечивает высокое качество регулирования в нижней части диапазона с возможностью установки любых значений коэффициента сдвига тока на сетевом входе. Такие же возможности предоставляют и корректоры коэффициента мощности на основе повышающего импульсного регулятора [8]. Обеспечивая активную коррекцию коэффициента мощности, они предотвращают отбор несинусоидального тока из питающей сети.

Не переходя к дискуссии о преимуществах и недостатках различных схем преобразователей частоты в целях настоящей статьи о расчете и оптимизации управляющих воздействий - общих проблемах применения всех упомянутых технических решений, рассмотрим из этого перечня наиболее мощные и практически применяемые электроприводы с двухзвенными преобразователями частоты.

При использовании асинхронного двигателя на 380/220 В возможно включение обмоток двигателя в «треугольник» и в «звезду» [6]. Первый способ подключения двигателя к выходу преобразователя частоты с компенсационным выпрямителем в звене постоянного тока позволяет компенсировать реактивную мощность распределительной сети в три раза большую, чем при питании двигателя с включением обмоток в «звезду». Однако значения одинаковых углов управления вентилями анодной и катодной групп активного компенсационного выпрямителя диктуются механической нагрузкой на электродвигатель, при этом компенсационный преобразователь генерирует реактивную мощность в сеть «по остаточному принципу».

Вместе с тем, уровень генерируемой в распределительную сеть реактивной мощности емкостного характера требует непрерывной коррекции из-за непрерывного изменения нагрузки электроприемников, включенных параллельно на эту сеть, о чем свидетельствуют изменения мгновенного значения напряжения в сети.

Авторами предложены два способа решения этой проблемы [6]:

- использовать раздельное управление углами  $\alpha_e$  и  $\alpha_n$  вентилях групп, работающих соответственно при естественной и принудительной коммутации;
- применять наряду с фазовым регулированием выпрямленного напряжения на выходе посредством изменения угла управления  $\alpha_n$  КВ также и регулирование тока двигателя на выходе автономного инвертора тока посредством широтно-импульсной модуляции (ШИМ), изменяя степень регулирования  $\gamma_{\text{шим}}$ .

Такие подходы позволяют решать и технологическую задачу, обеспечивая заданные момент и скорость вращения двигателя, и регулирование величины компенсируемой реактивной мощности в сети. Изменением управления - в координатах  $\alpha_e$  и  $\alpha_n$  в допустимой для них области можно обеспечить обоснованное значение циркулирующей в сети реактивной мощности в определенных границах, которые зависят от технологической загрузки двигателя и установленной мощности компенсационного выпрямителя.

Однако при таком управлении преобразователем проявляется отрицательный фактор – гармоники тока в сети, в том числе и четные. Применение активного фильтра гармоник позволяет улучшить качество электрической энергии [10]. Кроме того, фаза гармоник у не-

скольких параллельно подключенных компенсационных выпрямителей изменяется при изменении угла управления и они могут взаимно компенсироваться. Если же применять в качестве преобразователей частоты автономные инверторы напряжения, питаемые от неуправляемых выпрямителей, обеспечивающих  $\cos \varphi = 1$  во всем диапазоне регулирования скорости, то фазы гармоник подключенных параллельно преобразователей останутся всегда постоянными, гармоники от разных преобразователей будут суммироваться, усугубляя ситуацию.

Другая использованная авторами возможность – регулирование тока двигателя на выходе автономного инвертора посредством изменения степени ШИМ  $\gamma_{\text{оèì}}$  независимо от напряжения на входе инвертора, то есть независимо от напряжения на выходе КВ, изменяемого углом управления  $\alpha_{\text{и}}$ , – позволяет обеспечить как заданные момент и скорость вращения двигателя, так и регулирование величины компенсируемой реактивной мощности.

Задача управления рассматриваемыми системами электроприводов – найти оптимальное соотношение между значениями углов управления  $\alpha_{\text{е}}$  и  $\alpha_{\text{и}}$ , в первом случае, и угла управления  $\alpha_{\text{и}}$  вентилями компенсационного выпрямителя и степенью широтно-импульсной модуляции тока инвертора  $\gamma_{\text{оèì}}$ , во втором случае, доставляющие

$$\min(\text{tg } \varphi_{\text{сети}}) = \min_{\alpha_{\text{е}}, \alpha_{\text{и}}} \left( \frac{Q_{\text{сети}} - Q_{\text{КВ}}}{P_{\text{КВ}}} \right), \quad \min(\text{tg } \varphi_{\text{сети}}) = \min_{\alpha_{\text{и}}, \gamma_{\text{ШИМ}}} \left( \frac{Q_{\text{сети}} - Q_{\text{КВ}}}{P_{\text{КВ}}} \right), \quad (1)$$

где  $Q_{\text{КВ}}$  и  $P_{\text{КВ}}$  – реактивная и активная мощность компенсационного выпрямителя. Под управлением устройства оптимизации обеспечивается достижение указанных целевых функций.

Компенсация реактивной мощности – является одной из форм влияния рассматриваемых преобразователей на сеть. Это влияние зависит от степени регулирования выпрямленного напряжения на выходе звена постоянного тока [9]. При этом полная мощность, потребляемая преобразователем из сети, коэффициент мощности преобразователя и активная мощность на входе КВ находятся в соотношениях:

$$S = m U_{\phi} I_{\phi}; \quad K_{\text{м}} = \frac{\sqrt{6}N}{2\pi K_{\phi}} C_p; \quad P_{(1)} = m U_{\phi} I_{\phi(1)} \cos \varphi,$$

где  $m; U_{\phi}; I_{\phi}; N; K_{\phi} = I_{\phi} / I_d; C_p = U_d / U_{d0}; I_{\phi(1)}; \cos \varphi$  соответственно: число фаз сети; действующее значение фазного напряжения сети; действующее значение тока фазы сети; число трехфазных схем с нулевым выводом, на которые можно разложить преобразователь; коэффициент формы тока; степень регулирования выпрямленного напряжения; действующее значение первой гармонической сетевого тока; коэффициент сдвига первой гармонической сетевого тока относительно напряжения сети.

Отсюда следует, что коэффициент мощности зависит, с одной стороны, от степени регулирования выходного напряжения выпрямителя, а с другой – от коэффициента сдвига и коэффициента искажений сетевого тока:

$$K_{\text{м}} = \frac{\sqrt{6}N}{2\pi K_{\phi}} C_p = \frac{I_{\phi(1)}}{I_{\phi}} \cos \varphi = K_u \cos \varphi,$$

$$\text{где } K_u = \frac{I_{\phi(1)}}{I_{\phi}} = \frac{I_{\phi(1)}}{\sqrt{I_{\phi(1)}^2 + \sum_{\kappa=2}^{40} I_{\phi(\kappa)}^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + THD_{\text{о.е.}}^2}},$$

и, в свою очередь,  $I_{\phi(\kappa)}$  – действующее значение  $\kappa$ -й гармоники тока;  $THD_{\text{о.е.}}$  – общее гармоническое искажение, выраженное здесь в относительных единицах.

Мощность искажений, которая является составляющей полной мощности  $S$  при несинусоидальной форме тока [10]:

$$T = mU_{\phi} \sqrt{\sum_{k=2}^{40} I_{\phi(k)}^2} = S_{(1)} \sqrt{\frac{1}{K_u^2} - 1} = S_{(1)} THD_{o.e.}, \quad (2)$$

где  $S_{(1)} = \sqrt{P_{(1)}^2 + Q_{(1)}^2}$  - полная мощность первой гармоники. Тогда полная мощность, потребляемая из сети,  $S = mU_{\phi} I_{\phi} = \sqrt{P_{(1)}^2 + Q_{(1)}^2 + T^2}$ .

Для схемы, предложенной авторами в [6], использующей раздельное управление углами вентиляей групп, работающих при естественной и принудительной коммутации, мостовая схема может быть представлена соединением двух нулевых схем, а действующее значение выпрямленного напряжения может быть представлено как:

$$U_d = \frac{3}{\pi} \sqrt{6} U_c \sin \frac{\pi}{6} [\cos \alpha_u + \cos(\gamma - \alpha_e)] \approx \frac{U_{d0}}{2} \cos \alpha_u + \frac{U_{d0}}{2} \cos \alpha_e, \quad (3)$$

где  $U_{d0}$  - максимальное напряжение КВ, то есть напряжение промежуточного контура постоянного тока, значение которого приближается к амплитуде линейного напряжения питающей сети  $U_{d0} \approx \sqrt{2} U_n$ .

С другой стороны, от углов  $\alpha_e$  и  $\alpha_u$  зависит и величина потребляемой активной и реактивной мощности, мощность искажения.

Так, без учета потерь в автономном инверторе ДПЧ и в двигателе, полезная потребляемая приводом активная мощность

$$P_{(1)} = mU I_{1(1)} \cos \varphi_{(1)}, \quad (4)$$

где  $m$  - число фаз преобразователя;  $\varphi_{(1)}$  - сдвиг по фазе между основными гармониками первичного напряжения и первичного тока.

Реактивная мощность, потребляемая из сети,

$$Q_{(1)} = mU I_{1(1)} \sin \varphi_{(1)}. \quad (5)$$

Мощность искажений определяется высшими гармоническими составляющими тока (2), должна быть учтена при нахождении допустимых величин активной и реактивной мощностей, потребляемых из сети, которые равны соответствующим мощностям на входе КВ.

В схеме КВ с искусственной коммутацией обеих групп вентиляей сетевой ток может содержать существенные по величине 5-ю, 7-ю, 11-ю, 13-ю и 17-ю гармоники. Многие авторы, в том числе [10], отмечают, что мощность искажения есть всегда и мало зависит от угла управления преобразователем. Зависимости для коэффициента искажения тока как преобразователей с естественной, так и преобразователей с искусственной коммутацией вентиляей известны, например, [9, 10]. Однако следует принять во внимание рекомендации А.А. Булгакова относительно мощности искажений: высшие гармонические составляющие трудно учитывать, они более подвержены влиянию случайных факторов из-за колебаний напряжения сети и нагрузки. Точное описание искажения тока регулярными функциями не имеет смысла и практически невозможно. Для характеристики качества преобразования тока достаточно грубых интегральных оценок.

По экспериментальным данным зависимости  $THD_{o.e.}$  от углов управления разными группами вентиляей  $\alpha_e$  и  $\alpha_u$  определены уравнения линейной регрессии, приведенные на рис.1, для линий тренда, соответствующих граничным значениям углов управления. При изменении отношения индуктивности питающей сети к индуктивности в звене постоянного тока на два десятичных порядка коэффициенты вариации параметров уравнений линейной регрессии не превышают 14%. Степень достоверности аппроксимации  $R^2$  высокая. Однако при изменении угла управления в альтернативной группе вентиляей коэффициент наклона линии тренда меняет не только величину, но и знак. Авторы предлагают использовать в алгоритмах микропроцессорного управления соотношениями  $\alpha_e$ ,  $\alpha_u$  и  $\alpha_u, \gamma_{\text{шим}}$  опорную таб-

лицу значений  $THD_{o,e}$  в зависимости от углов управления разными группами вентиляей  $\alpha_e$  и  $\alpha_{и}$  или от переменных  $\alpha_{и}, \gamma_{ШИМ}$ , в зависимости от структуры преобразователя частоты, с последующей интерполяцией для вычисления мощности искажений при определении ограничений на величины переменных управления.

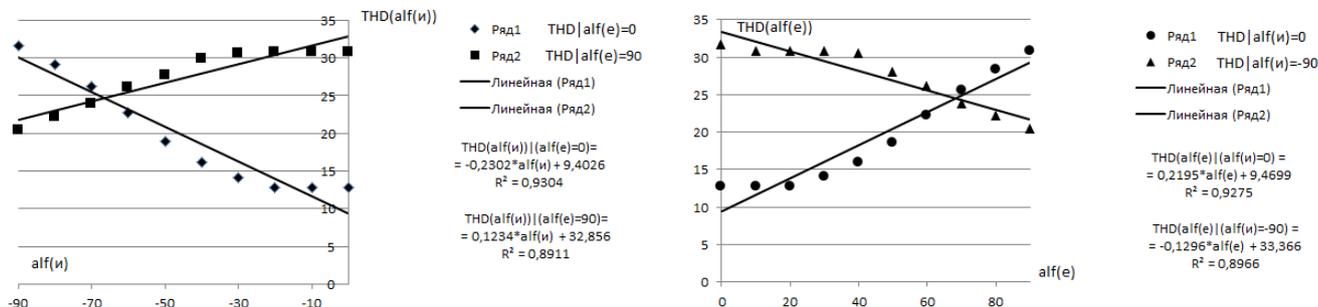


Рис. 1. Зависимости  $THD_{i,d}$  от углов управления разными группами вентиляей  $\alpha_e$  и  $\alpha_{и}$

Поскольку  $\cos\varphi = \cos(\alpha+\gamma/2)$ , при допущении  $\gamma/2 \cong 0$ , можно считать, что  $\varphi_{(1)} = \alpha$ . Тогда реактивная мощность, генерируемая (потребляемая) КВ, будет:

$$Q_{КВ} = mU I_{1(1)} (\sin \alpha_e + \sin \alpha_u), \quad (6)$$

где  $\alpha_{и} < 0$ .

В этом случае требуется вычислить такие значения углов управления группами вентиляей  $\alpha_e$  и  $\alpha_{и}$ , которые обеспечат как необходимое значение выпрямленного напряжения  $U_d$ , так и желаемую величину потребляемой или генерируемой в сеть реактивной мощности. Это достигается не только совместным решением уравнений (3) и (6). При вычислении углов необходимо исходить из резервов установленной мощности электрооборудования привода, принимая во внимание как мощность искажения, так и внешние характеристики КВ, определяющие необходимую величину  $U_d$  при заданной технологической мощности на валу двигателя.

Внешние характеристики преобразователя переменного тока в постоянный представляют собой зависимость среднего значения выпрямленного напряжения на нагрузке от среднего значения выпрямленного тока. Если допустить пренебрежимо малость активных сопротивлений сети и потерь в двигателе, тогда выражение для внешней характеристики трехфазной нулевой схемы, в которую собраны вентиляи, работающие с естественной коммутацией при угле управления  $\alpha_e$ , примет вид:

$$U_{d\alpha e} = \frac{3\sqrt{6}}{2\pi} U_{\phi} \cos \alpha_e - \frac{3}{2\pi} I_d x_s,$$

где  $x_s$  - индуктивное сопротивление сети.

Таким же будет уравнение внешней характеристики и для трехфазной нулевой схемы, в которую собрана группа вентиляей, работающих с опережающим углом управления  $\alpha_u$ , если пренебречь вольтодобавкой, вносимой конденсатором коммутационного фильтра этой группы на интервале коммутации, которая компенсирует уменьшение выпрямленного напряжения за счет эффекта «перекрывтия».

На основании изложенного можно привести перечень задач идентификации (вычисления) и оптимизации в энергосберегающем управлении электроприводами:

1) распределение генерируемой реактивной мощности между имеющимися в узле нагрузки «классическими» средствами ее компенсации: конденсаторными батареями, фидрокомпенсирующими установками, синхронными двигателями;

2) управление токами возбуждения СД, входящими в группу электроприводов, питаемых от единого узла нагрузки;

3) распределение генерируемой реактивной мощности между статорной обмоткой СД и компенсационным выпрямителем в цепи возбудителя;

4) распределение установленной мощности компенсационного выпрямителя в звене постоянного тока двухзвенного преобразователя частоты электропривода переменного тока между технологической нагрузкой и реактивной нагрузкой, компенсирующей реактивную мощность в распределительной сети. При этом должны быть осуществлены вычисления мощности искажений, а также необходимой величины напряжения на выходе КВ с учетом внешней характеристики;

5) распределение генерируемой реактивной мощности между всеми имеющимися в узле нагрузки средствами ее компенсации.

Из перечисленных задач только 1), 2), 3) и 5) могут быть сведены к задачам математического программирования, алгоритмы решения которых приведены в [2, 11].

В основе предлагаемых алгоритмов решения задач идентификации и оптимизации лежит способ решения уравнений при помощи итераций. Известно, что при этом уравнение, записанное в неявной форме  $F(x) = 0$ , заменяется уравнением вида  $x = f(x)$ , равносильным данному. Это можно всегда сделать, и притом многими способами. Затем при грубом приближенном значении корня находится значение функции  $f(x)$  при этом значении – первое приближение, которое подставляется в правую часть уравнения. Этот процесс можно продолжать неограниченно, получая числовую последовательность, члены которой с возрастанием номера будут приближаться к истинному значению искомого корня.

Решение нелинейных и нестационарных уравнений целесообразно осуществлять с использованием рекуррентных методов, которые, по сути, эквивалентны итерационным методам. В основе этого подхода лежит использование штрафной функции. С одной стороны, такая штрафная функция  $D$  принимается равной разности правой и левой части эквивалентного исходному нелинейного уравнения  $D = f(x) - x = dx/dt$ .

С другой стороны, штрафная функция используется в роли производной неизвестной (искомой) переменной, после интегрирования которой её текущие значения « $x$ » подставляются в выражение, формирующее штрафную функцию.

Значение получаемой таким образом штрафной функции с течением времени уменьшается, а нелинейная система приходит в равновесие. В описанной процедуре несложно разглядеть принцип регулирования выходной переменной некоторого объекта с использованием интегрального регулятора.

Для моделирования непрерывных процессов используются языки Динамо, CSMP, Midas. Наиболее удобна для иллюстрации предложенных методов моделирования программа VenSim, широко используемая в Гарвардском университете и представляющая собой усовершенствованный язык Динамо [12]. Эта среда программирования предпочтительнее программного комплекса MATLAB Simulink благодаря своей универсальности, возможности производить как структурный, так и динамический анализ моделей, получать текстовую копию сконструированной структурной модели, фиксировать без дополнительного программирования результаты различных сценариев вычислительного эксперимента. На рис.2 приведена непрерывная вычислительная схема решения нелинейных и нестационарных уравнений математической модели системы управления электроприводом, выполненная в программе VenSim.

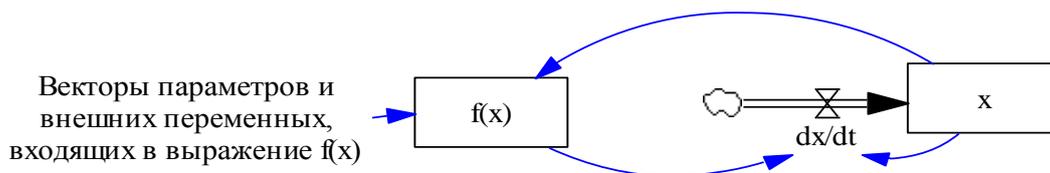
Следует отметить, что при использовании «неинтегральных» способов вычисления корня, процесс вычислений должен прерываться заранее предусмотренной процедурой, например, при достижении заданной точности [11]. Предложенный метод снимает проблему остановки вычислений, которые непрерывно производятся в процессе регулирования переменных состояния объекта.

На рис. 3 показана вычислительная схема (математическая модель процесса) решения,

реализующая алгоритм, предложенный ранее, и позволяющая решить комплексную задачу энергосбережения. Под управлением оптимизирующего устройства обеспечивается решение уравнений (3) и (6), а также достижение целевой функции

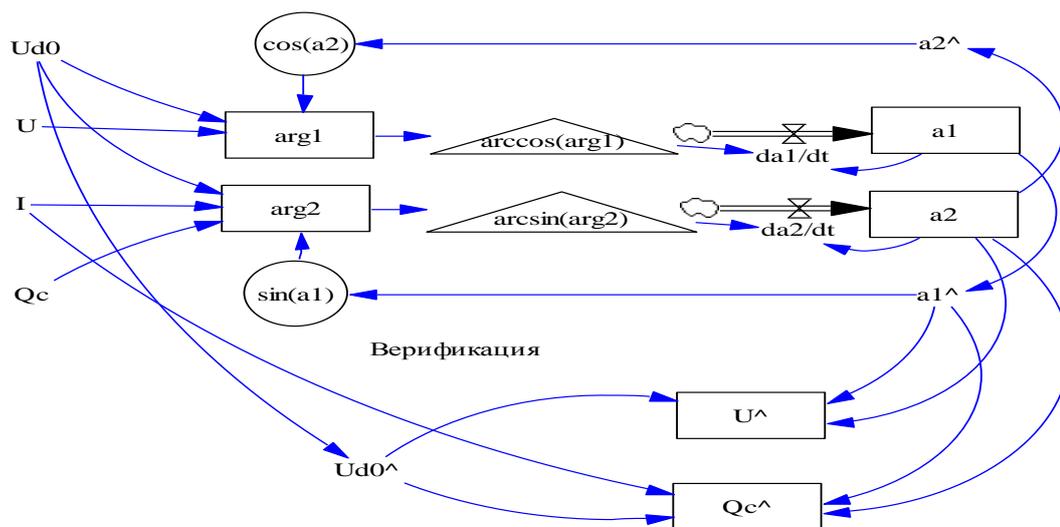
$$\min(\operatorname{tg} \varphi_{\text{сети}}) = \min_{\alpha_e, \alpha_u} \left( \frac{Q_{\text{сети}} - Q_{\text{КВ}}}{P_{\text{КВ}}} \right),$$

где  $Q_{\text{сети}}$  – реактивная мощность, циркулирующая в распределительной сети и подлежащая компенсации;  $\alpha_e = \alpha_1$ ,  $\alpha_u = \alpha_2$ .



**Рис. 2. Непрерывная вычислительная схема решения нелинейных и нестационарных уравнений математической модели системы управления электроприводом**

Модель идентификации значений углов управления группами вентилей активного компенсационного выпрямителя



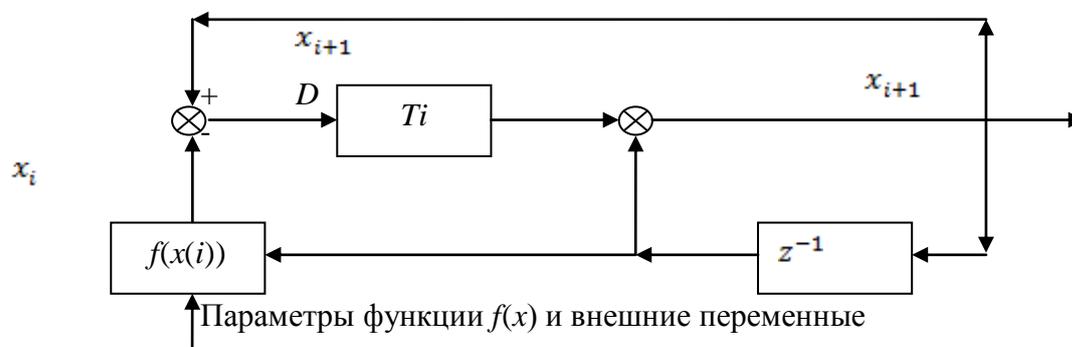
**Рис. 3. Вычислительная схема (математическая модель процесса) решения нелинейных и нестационарных уравнений (3) и (6)**

Выполнение указанных вычислений в системе управления электроприводом производится при помощи встроенных микроконтроллеров (МК) или программируемых логических контроллеров (ПЛК). Для реализации предложенной нелинейной схемы вычисления численными методами произведена дискретизация производной искомой величины по методу Эйлера:

$$D = \frac{dx}{dt} \cong \frac{\Delta x}{T_i} = (x_{i+1} - x_i) / T_i. \tag{7}$$

Тогда искомая переменная вычисляется рекуррентным разностным методом согласно выражению:  $x_{i+1} = x_i + DT_i$ . Определить аналитическим путем максимально допустимое значение  $T_i$ , не нарушающее сходимости решения в общем случае, не удастся из-за сложности исходной зависимости, однако это значение, принимаемое неизменным в пределах 0.02 - 0.1 от величины минимальной постоянной времени управляемого объекта, легко подбирается, обеспечивая быстрое решение согласно схеме на рис. 4.

Элемент задержки  $z^{-1}$  позволяет сделать необходимые подстановки значений  $x_i$  в  $f(x)$  для получения величины  $x_{i+1}$ . Целесообразность использования рекуррентных разностных методов объясняется не только тем, что реализуются они в составе микропроцессорной системы, но и тем, что классические методы численного интегрирования при той же точности по объемам вычислений менее эффективны и не обладают той физической наглядностью, которую имеют методы цифрового моделирования.



**Рис. 4. Дискретная вычислительная схема решения нелинейных и нестационарных уравнений математической модели системы управления электроприводом**

Лабораторные испытания дискретных вычислительных схем были произведены с применением микроконтроллера ATmega168 на платформе Arduino [13]. Программирование на языке С не только позволяет сосредоточиться на программировании одной лишь логики, не заботясь о машинном коде, не только может использоваться для программирования любого микропроцессора, но в наших целях это единственно возможный подход из-за необходимости использования библиотеки математических функций `<math.h>`. Однако на практике разработчики вынуждены применять ПЛК, как конструктивно законченное изделие, способное работать в тяжелых цеховых условиях при загрязненном воздухе, вибрациях, электрических помехах, осуществлять связи с ЭВМ верхнего уровня. Благодаря наличию языка структурированного текста ST, основой программ на котором служат выражения, алгоритмы были реализованы и на ПЛК S7-300.

### Выводы

1. На основании изложенного сформирован перечень задач идентификации (вычисления) и оптимизации в энергосберегающем управлении электроприводами.
2. Для комплексной системы управления группой СД, обеспечивающей компенсацию реактивной мощности в распределительной сети. Авторами предложено использовать компенсационный выпрямитель для питания обмотки возбуждения СД и предложена методика для определения мощности компенсационного выпрямителя, разработан алгоритм численного моделирования процесса оптимизации режима работы системы, идентификации ее параметров и вычисления выходных переменных.
3. Частотно регулируемый электропривод переменного тока с компенсационным выпрямителем в звене постоянного тока преобразователя частоты является новым средством компенсации реактивной мощности, устанавливаемым непосредственно у потребителя. Он улучшает технико-экономические показатели системы электроснабжения, благодаря уменьшению потоков реактивной мощности во всех элементах сети от источников питания до потребителей. Это, в свою очередь, приводит к снижению потерь электроэнергии и к уменьшению затрат на их возмещение в структуре баланса.
4. В активном компенсационном выпрямителе звена постоянного тока частотно-управляемого электропривода авторами предложено использовать раздельное управление

углами вентилях групп, работающих при естественной и принудительной коммутации. При вычислении углов необходимо исходить из резервов установленной мощности электрооборудования привода, принимая во внимание как мощность искажения, так и внешние характеристики КВ, определяющие необходимую величину  $U_d$  при заданной технологической мощности на валу двигателя. Такой подход позволяет решать и технологическую задачу, обеспечивая заданные момент и скорость вращения двигателя, и регулирование величины компенсируемой реактивной мощности в сети. Под управлением оптимизирующего устройства обеспечивается либо достижение целевой функции – максимизации коэффициента мощности питающей сети, либо ограничение перенапряжений в узле нагрузки.

5. В Нижегородском государственном техническом университете им. Р.Е. Алексеева предложено применять наряду с фазовым регулированием выпрямленного напряжения на выходе КВ регулирование напряжения двигателя на выходе автономного инвертора тока посредством широтно-импульсной модуляции. Изменением управления в координатах  $\alpha_i$  и  $\gamma_{\phi i}$  можно обеспечить обоснованное значение циркулирующей в сети реактивной мощности в определенных границах, которые зависят от технологической загрузки двигателя и установленной мощности компенсационного выпрямителя.

6. Идентифицирующие и оптимизирующие устройства, алгоритмы работы которых синтезированы на основе метода системной динамики, реализованы программно на языке С применительно к микроконтроллерам и на языке структурированного текста ST (МЭК) применительно к промышленным программируемым контроллерам.

7. В качестве программной среды для проверки вычислительных итерационных схем на работоспособность, устойчивость и быстродействие, а также для имитационного динамического моделирования электромагнитных процессов в электроприводе рекомендована программа VenSim.

#### Библиографический список

1. **Титов, В.Г.** Анализ использования синхронных двигателей в качестве компенсаторов реактивной мощности / В.Г.Титов, А.С. Плехов // Электрооборудование промышленных установок: труды Нижегород. гос. техн. ун-та / НГТУ. – Нижний Новгород, 2005. С. 5–7.
2. **Титов, В.Г.** Оптимизация электропотребления посредством управления возбуждением группы синхронных двигателей / А.С. Плехов, В.Г. Титов, М.Н. Охотников // V Международная (XVI Всероссийская) конференция по автоматизированному электроприводе АЭП-2007 / Санкт-Петербург, 2007.
3. Пат. на полезную модель № 78018. Полупроводниковый компенсатор реактивной мощности / А.И. Зайцев, А.С. Плехов. 2008.
4. **Вагин, Г.Я.** Компенсация реактивной мощности в электрических сетях с нелинейными нагрузками / Г.Я. Вагин, А.А. Севостьянов, С.Н. Юртаев // Актуальные проблемы электроэнергетики. – Нижний Новгород, 2010. С. 93–97.
5. **Зайцев, А.И.** Применение компенсационных преобразователей в качестве источников реактивной мощности / А.И. Зайцев, А.С. Плехов, В.И. Рудницкий // Актуальные проблемы электроэнергетики. – Нижний Новгород, 2008. С. 11–15.
6. **Плехов, А.С.** Технология энергосбережения в электроприводе / А.С. Плехов, М.Н. Охотников, В.Г. Титов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2011. № 1(86). С. 193–203.
7. Пат. на изобретение № RU 2395891 С1. Способ скалярного управления матричным преобразователем частоты / С.Н. Сидоров. 2009.
8. **Мелешин, В.И.** Транзисторная преобразовательная техника / В.И. Мелешин. – М.: Техносфера, 2005. – 632 с.
9. **Тихомиров, В.А.** Исследование и разработка компенсированного тиристорного преобразователя для электропривода постоянного тока: дисс. ... канд. техн. наук / В.А. Тихомиров. Горький, 1974.

10. **Тихомиров, В.А.** Технические и экономические аспекты применения регулируемых приводов постоянного и переменного тока / В.А. Тихомиров, В.Г. Титов, С.В. Хватов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2010. № 4(83). С. 190–204.
11. **Калиткин, Н.Н.** Численные методы / Н.Н. Калиткин. – М.: Наука, 1978.
12. Теория систем и методы системного анализа в управлении и связи / В.Н. Волкова [и др.]. – М.: Радио и связь, 1983. – 248 с.
13. **Кашканов, А.О.** Разработка микропроцессорной платформы для управления компенсационным преобразователем / А.О. Кашканов, А.С. Плехов // Будущее технической науки: сб. мат. X междунар. молодеж. научно-техн. конф. / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2011. С. 88.

*Дата поступления  
в редакцию 19.07.2011*

**A.S. Plehov, M.N. Ohotnikov, V.G. Titov**

### **PROBLEMS TO IDENTIFICATIONS AND OPTIMIZATION UNDER ECONOMY CONTROL OF ELECTRIC DRIVE AND ALGORITHMS OF THEIR DECISION**

In purpose of the compensations to reactive power in distributing network of supply of the enterprise are considered calculations of the correlations angle control group valves of the compensation rectifier in section of the direct current electric drive, correlations between value of the corner of compensation converter control and degree to width-pulse inflexion of the output flow to energy of the inverter of the current. Dare the problems to optimization of the correlation current excitation in group of the synchronous engines and relative loading by reactive power of the engines and converters electric drives. The approaches are discussed to realization microprocessor identifying computing and optimizing device. They are offered computing schemes device to identifications and optimization, which are realized on microcontroller by means of program, written on language C and on language of the outline text ST in the event of using programmed logical controller. As ambiances for checking computing разностных schemes is used ambience of simulation dynamic modeling VenSim.

*Key words:* compensation to reactive power; энергосберегающее control electric drive; excitation control synchronous electric motors for compensation of the reactive power; controlled electric drive with compensation rectifier in section of the direct current of the converter of the frequency; relative boot by reactive power of the converters electric drive; the algorithms of the calculations; the algorithms to optimization.