

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТИРИСТОРНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С ДВУХЗОННЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ СКОРОСТИ С УЛУЧШЕННЫМИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, А.А. Лукин, Г.В. Шурыгина, В.В. Головин***

** г. Магнитогорск, МГТУ,*

*** ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат»*

EXPERIMENTAL RESEARCHES OF TWO-ZONAL SPEED CONTROL THYRISTOR ELECTRIC DRIVES WITH IMPROVED ENERGY CHARACTERISTICS

A.S. Karandaev, V.R. Khrumshin, A.A. Lukin, G.V. Shurygina, V.V. Golovin***

** Magnitogorsk, MSTU,*

*** Open joint-stock company «Magnitogorsk iron-and-steel works»*

Представлено описание разработанных систем двухзонного регулирования скорости, обеспечивающих улучшение энергетических показателей тиристорных электроприводов прокатных станов за счет перераспределения запаса выпрямленной ЭДС тиристорного преобразователя в установившемся и динамических режимах. Дано описание лабораторной установки, представлены результаты экспериментальных исследований, подтвердившие возможность снижения запаса выпрямленной ЭДС.

Ключевые слова: прокатный стан, электропривод, энергетические показатели, способы улучшения, экспериментальные исследования.

The disruption of the two-zonal speed control developed systems is presented. They provide the improvement of energy index of rolling mills thyristor electric drives at the expense of redistribution of the thyristor converter EMF rectification reserve in stable and dynamic modes. The description of the laboratory set is given. The results of experimental researches, varifying the opportunity of EMF rectification reserve reduction are represented (introduced).

Keywords: rolling mill, electric drive, energy index, improvement methods, experimental researches.

К тиристорным электроприводам чистовой группы широкополосного стана горячей прокатки (ШСГП) предъявляются жесткие требования в отношении обеспечения надежности и высокого быстродействия в динамических режимах. Наиболее тяжелыми динамическими режимами являются:

- режим ударного изменения нагрузки в момент захвата полосы;
- разгон, возникающий при прокатке с ускорением.

Безаварийная работа ЭП может быть обеспечена лишь в том случае, если динамический запас системы регулирования, и в первую очередь запас выпрямленной ЭДС тиристорного преобразователя (ТП), будут обеспечены в названных динамических режимах. Дополнительное увеличение запаса обеспечивает увеличение надежности ЭП, однако приводит к ухудшению энергетических показате-

лей за счет увеличения потребления реактивной мощности, зависящей от степени регулирования выпрямленной ЭДС.

Теоретические и экспериментальные исследования динамических режимов главных электроприводов ШСГП 2000 позволили определить уровень потребляемой реактивной мощности, составляющий 0,6–1,2 Мвар на клеть, что приводит к потерям электрической энергии в пределах 1,3–2 млн кВт·ч/год. Такие потери предопределяют необходимость проведения мероприятий по уменьшению потребления реактивной энергии.

С целью ограничения запаса в динамическом режиме разгона при наличии металла в валках, т. е. при относительно плавном увеличении тока нагрузки разработаны способ и система двухзонного зависимого регулирования скорости в функции выпрямленной ЭДС тиристорного преобразо-

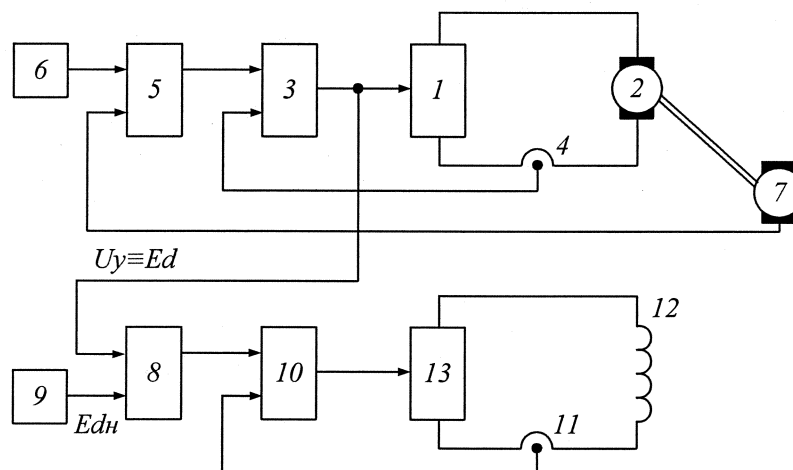


Рис. 1. Функциональная схема системы управления потоком возбуждения в функции выпрямленной ЭДС: 1 – тиристорный преобразователь; 2 – якорь двигателя; 3 – регулятор тока якорной цепи; 4 – датчик тока; 5 – регулятор скорости; 6 – задатчик интенсивности; 7 – тахогенератор; 8 – регулятор ЭДС; 9 – задатчик выпрямленной ЭДС; 10 – регулятор тока возбуждения; 11 – датчик тока возбуждения; 12 – обмотка возбуждения; 13 – тиристорный возбудитель

вателя, согласно которому задающее воздействие на регулятор внешнего контура в цепи возбуждения формируется пропорциональным номинальной выпрямленной ЭДС ТП [1]. Функциональная схема системы регулирования, реализующей предложенный способ, представлена на рис. 1. Обратная связь подается с выхода регулятора тока якорной цепи, что позволяет исключить применение датчика выпрямленной ЭДС и за счет этого упростить устройство.

В установившемся режиме работы под нагрузкой регулятор выпрямленной ЭДС обеспечивает постоянство последней на заданном номинальном уровне независимо от тока нагрузки. Напряжение на якоре и ЭДС двигателя с ростом тока уменьшаются вследствие увеличения падений напряжения на соответствующих внутренних сопротивлениях. При этом величина запаса выпрямленной ЭДС ТП остается постоянной независимо от тока нагрузки. Вследствие этого при всех значениях тока в диапазоне от нуля до номинального в разработанной системе обеспечивается меньший уровень запаса и соответственно лучшие энергетические показатели работы ЭП.

Применение предложенного способа рекомендуется для электроприводов прокатных станов, работающих в широком диапазоне токов нагрузки при относительно плавном ее изменении. Для главных ЭП ШСГП данный способ позволяет исключить увеличение выпрямленной ЭДС выше заданного номинального значения при ускорении во время прокатки и за счет этого обеспечивает возможность снижения запаса выпрямленной ЭДС.

Однако быстродействие системы регулирования ЭДС по цепи возбуждения двигателя при традиционных настройках регуляторов примерно на порядок ниже быстродействия системы регулирования скорости, что не позволяет обеспечить огра-

ничения выпрямленной ЭДС при ударном приложении нагрузки. В связи с этим разработан способ независимого управления током возбуждения в функции выпрямленной ЭДС ТП с автоматическим изменением уставки выпрямленной ЭДС [2]. Суть предложенного способа поясняется с помощью временных диаграмм, представленных на рис. 2, которые показывают характер переходных процессов тока I , ЭДС двигателя E и выпрямленной ЭДС E_d при ударном приложении нагрузки в момент $t=0$, а также при плавном увеличении нагрузки в промежутке времени $t_2 \div t_3$.

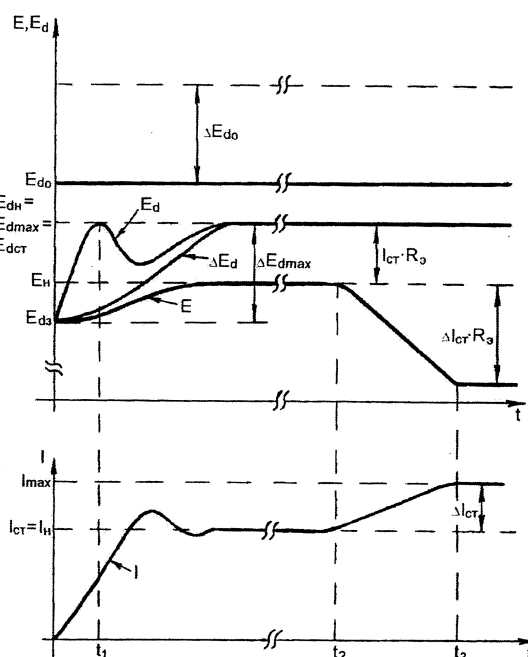


Рис. 2. Временные диаграммы тока, ЭДС двигателя и выпрямленной ЭДС в системе с автоматическим изменением уставки выпрямленной ЭДС ТП

Задание выпрямленной ЭДС E_{d3} тиристорного преобразователя устанавливается ниже номинальной выпрямленной ЭДС E_{dH} на величину ее перерегулирования $\Delta E_{d \max}$ при ударном приложении нагрузки, определяемую по зависимости [3]

$$E_{d \max} = L_{\Sigma} \frac{1}{k_1 T_T a} I_{CT},$$

где T_T – постоянная времени контура тока; a – отношение постоянных времени контуров скорости и тока; I_{CT} – установившийся (статический) ток.

Ударное приложение нагрузки, происходящее в момент времени $t=0$, сопровождается ростом тока I до установившегося значения I_{CT} , равного номинальному току I_H . Выпрямленная ЭДС (кривая E_d) получает приращение ΔE_d , которое предлагается осуществлять по аperiodическому закону. В результате она повышается до номинального уровня E_{dH} без перерегулирования (кривая E_d в момент времени t_1 не превышает E_{dH}). ЭДС E электродвигателя, которая в режиме холостого хода соответствует заданию E_{d3} , также повышается до своего номинального уровня E_H и поддерживается на данном уровне при установившемся токе нагрузки I_{CT} , не превышающем I_H (т. е. до момента времени t_2). При росте тока выше номинального (промежуток времени $t_2 \div t_3$) по-прежнему обеспечивается поддержание выпрямленной ЭДС E_d тиристорного преобразователя на уровне $E_d = E_{dH}$ за счет снижения ЭДС электродвигателя E на величину падения напряжения $\Delta I_{CT} R_{\Sigma}$ на эквивалентном сопротивлении R_{Σ} в цепи выпрямленного тока, здесь ΔI_{CT} соответствующее приращение тока нагрузки.

На рис. 3 показано подключение дополнительных узлов системы управления, позволяющих обеспечить данный способ регулирования. Суммарный сигнал на входах функционального преобразователя ФП равен разности $E_{d3} - E_{dH}$. При отсутствии статической нагрузки (при равенстве нулю сигнала на выходе датчика статического тока ДСТ) управляемый ключ УК замкнут и шунтирует

выход функционального преобразователя. Его выходной сигнал в этом режиме равен нулю, а величина выпрямленной ЭДС ТП в соответствии с заданием устанавливается равной

$$E_{d3} = E_{dH} - (L_{\Sigma} / (k_1 \cdot T_T \cdot a) I_{CT \max}),$$

т. е. уменьшается относительно номинального значения на величину максимального перерегулирования выпрямленной ЭДС ТП при ударном приложении нагрузки.

В момент ударного приложения нагрузки изменяется суммарный сигнал задания на входах регулятора ЭДС РЭ и выпрямленная ЭДС тиристорного преобразователя повышается до номинального уровня E_{dH} по аperiodическому закону. Регулятор ЭДС поддерживает значение выпрямленной ЭДС, равным E_{dH} в течение всего времени работы под нагрузкой независимо от величины нагрузки. Поскольку в предложенном способе управления потоком возбуждения отработка ударного приложения нагрузки происходит без перерегулирования выпрямленной ЭДС E_d тиристорного преобразователя, и кроме того, обеспечивается стабилизация выпрямленной ЭДС на заданном (номинальном) уровне при токе нагрузки, превышающем номинальный, выпрямленная ЭДС E_{d0} при нулевом угле управления может быть снижена на величину максимального приращения $\Delta E_{d0} = \Delta E_{d \max}$, т. е. на 16–22 % (см. рис. 2). Запас выпрямленной ЭДС ТП, необходимый для безаварийной отработки ударного приложения нагрузки, при этом будет обеспечен. После отработки динамического режима, когда необходимость в составляющей $\Delta E_{d \max}$ исключается, его величина автоматически уменьшается за счет повышения задания E_{d3} до номинального уровня, соответствующего номинальной выпрямленной ЭДС E_{dH} . Данный уровень ЭДС далее поддерживается постоянным независимо от величины тока нагрузки.

Предложенные системы двухзонного регулирования скорости электроприводов прокатных станов обеспечивают возможность снижения запаса

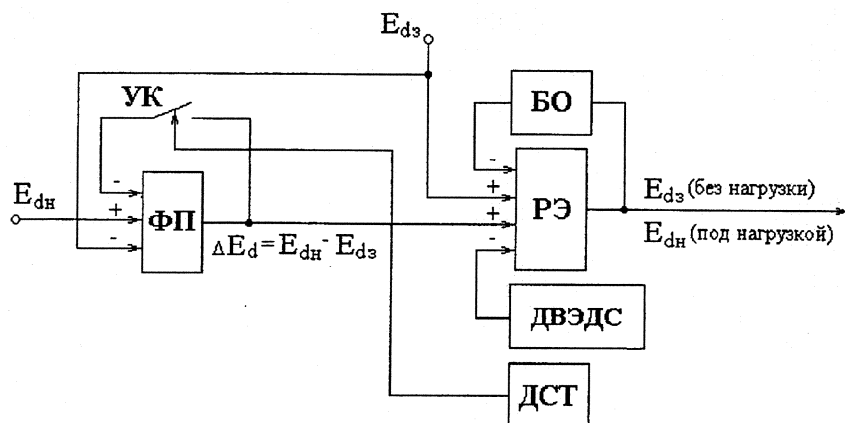


Рис. 3. Функциональная схема системы с автоматическим изменением уставки выпрямленной ЭДС тиристорного преобразователя: ДВ ЭДС – датчик выпрямленной ЭДС, ДСТ – датчик статического тока, УК – управляемый ключ

са выпрямленной ЭДС тиристорного преобразователя практически без ухудшения динамических показателей и надежности работы электропривода.

Для их исследования необходима разработка действующей лабораторной установки и проведение экспериментальных исследований в лабораторных условиях.

С целью исследования динамических режимов создана лабораторная установка, снабженная системой двухзонного регулирования скорости, выполненная на базе реверсивного тиристорного преобразователя типа КТЭ-100-220-922-1-УХЛ4. Силовая схема установки представлена на рис. 4. Применение двухмашинного агрегата и механического тормоза обеспечивает возможность как ударного, так и плавного изменения нагрузки. В качестве исполнительного механизма применен двигатель с номинальным якорным напряжением 220 В и током 14,5 А. Питание обмотки возбуждения осуществляется от тиристорного преобразователя типа ДТО ВВ 13 DGG 400/25 (выпрямленное напряжение ± 400 В, номинальный выпрямленный ток 25 А).

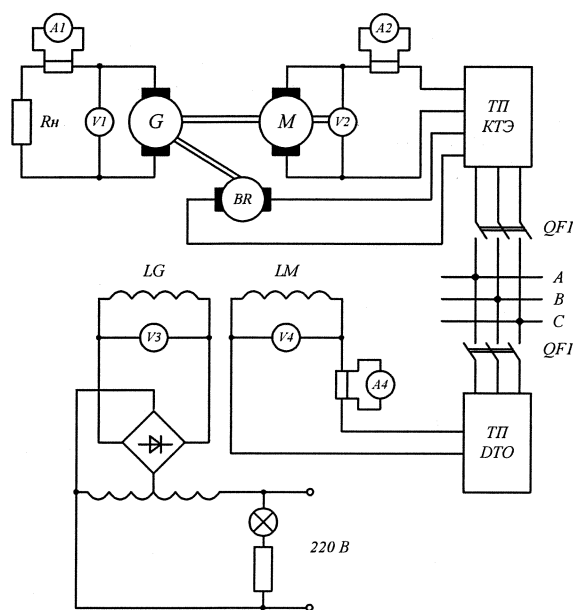


Рис. 4. Принципиальная схема лабораторной установки с двухзонным регулированием скорости

Система двухзонного регулирования выполнена на базе ячеек, входящих в комплект названных преобразователей. За счет переключения связующего параметра между системой управления напряжением якорной цепи и системой возбуждения осуществляется зависимое регулирование скорости в функции ЭДС двигателя либо в функции выпрямленной ЭДС ТП. Структура и настройка регуляторов систем регулирования скорости и ЭДС соответствуют принятым для электропривода стана 2000. САР скорости выполнена двухконтурной однократноинтегрирующей с настройкой П-регулятора скорости на модульный оптимум, САР ЭДС (либо

выпрямленной ЭДС) выполнена двухконтурной с интегральным регулятором ЭДС. При осуществлении зависимого управления в функции выпрямленной ЭДС в качестве сигнала обратной связи используется выходной сигнал регулятора тока якорной цепи, как это показано на рис. 1.

Кроме исследований отдельных динамических режимов было выполнено моделирование процессов за цикл прокатки (ударное приложение нагрузки, работа на установившейся скорости под нагрузкой, ускорение электропривода, сброс нагрузки). Управление осуществлялось с помощью компьютера, перечисленные режимы задавались в систему управления программно.

На рис. 5 представлены результаты экспериментальных исследований электропривода:

- в существующей системе зависимого регулирования скорости в функции ЭДС двигателя (рис. 5, а);

- в разработанной системе зависимого регулирования скорости в функции выпрямленной ЭДС ТП (рис. 5, б);

- в разработанной системе зависимого регулирования скорости с автоматическим изменением задания выпрямленной ЭДС ТП (рис. 5, в).

Приведены осциллограммы переходных процессов скорости ω , тока якорной цепи I , потока возбуждения Φ , ЭДС двигателя E и выпрямленной ЭДС E_d тиристорного преобразователя. Кривые представлены в относительных единицах, за базисные приняты номинальные значения перечисленных параметров. В результате сравнения представленных осциллограмм сделаны следующие выводы:

- переходные процессы скорости и тока во всех трех случаях имеют практически идентичный характер, соответствующий реальным процессам в электроприводе чистой клетки широкополосного стана;

- в известной системе ДЗРС в функции ЭДС двигателя в динамических режимах возникает превышение выпрямленной ЭДС ТП над номинальным значением;

- в первой разработанной системе (см. рис. 5, б) в режиме работы электропривода без нагрузки в интервалах времени $t=(1,5 \div 2)$ с и $t=(6 \div 6,5)$ с ЭДС электродвигателя превышает номинальное значение, что может привести к перенапряжению на якоре двигателя;

- во второй разработанной системе (рис. 5, в) в исследуемых динамических режимах не происходит превышения выпрямленной ЭДС ТП над номинальным значением, что позволяет снизить максимальную выпрямленную ЭДС ТП и обеспечить за счет этого улучшение энергетических показателей электропривода.

Таким образом, в результате экспериментальных исследований разработанных систем на действующей лабораторной установке подтверждены

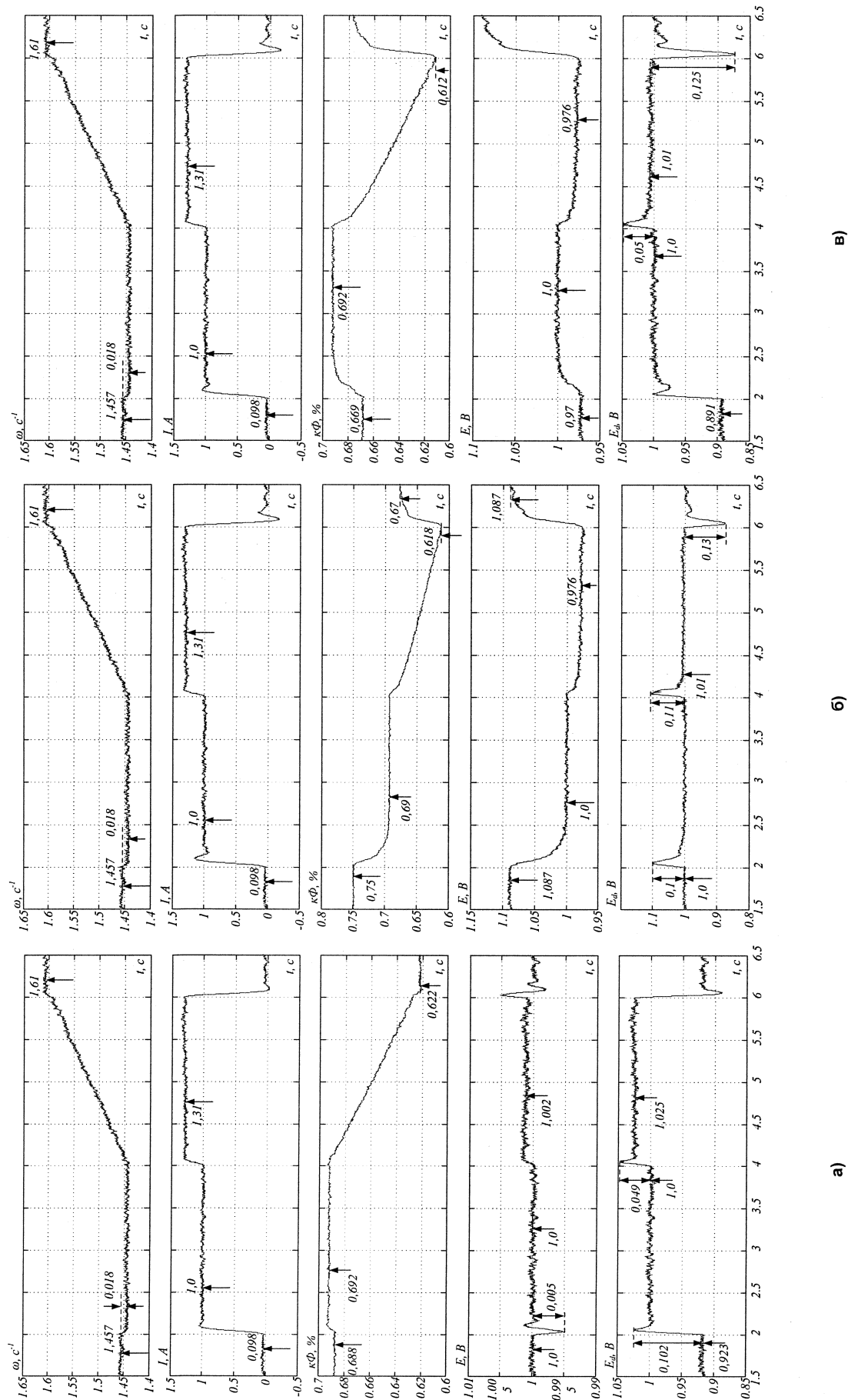


Рис. 5. Результаты моделирования режимов электропривода клетки в системах зависимого регулирования:
а – в функции E ; б – в функции E_α ; в – в функции E с переменной уставкой

работоспособность разработанных систем ДЗРС в функции выпрямленной ЭДС ТП.

Разгон под нагрузкой в системе ДЗРС (см. рис. 1) происходит без превышения выпрямленной ЭДС E_d установившегося номинального значения, (рис. 5, б). Переходные процессы скорости, тока и потока возбуждения идентичны процессам в действующей системе двухзонного регулирования в функции ЭДС двигателя. Однако как следует из осциллограмм, начальный момент разгона ЭП ($t=4$ с) сопровождается перерегулированием выпрямленной ЭДС ТП, достигающим 14–22 %. Это требует дальнейшей разработки технических решений, обеспечивающих снижение запаса выпрямленной ЭДС в динамических режимах.

Меньшее соотношение выпрямленной ЭДС E_{act} в установившемся режиме работы под нагрузкой (на рис. 2 $E_{act} = E_{dH}$) и максимальной выпрямленной ЭДС E_{d0} определяет более высокий коэффициент мощности в установившемся режиме и соответственно меньшие потери электрической энергии. Поскольку запас, необходимый в динамических режимах, сохраняется, показатели надежности электропривода остаются на требуемом высоком уровне.

Для вновь проектируемых ЭП улучшение энергетических показателей при применении рассмотренных систем двухзонного регулирования обеспечивается за счет рационального выбора вторичного напряжения преобразовательного трансформатора. По сравнению с напряжением, принимаемым в известных электроприводах подобного класса, его рекомендуется снизить на 10–12 % [4]. Это позволяет уменьшить потребление реактивной мощности на 7–12 %, т. е. практически без капи-

тальных затрат добиться снижения потерь электрической энергии. Для главных ЭП эксплуатируемых широкополосных станов горячей прокатки практически тот же эффект может быть обеспечен за счет переключения (либо установки дополнительных) отпаек вторичных обмоток трансформаторов.

Литература

1. Концепция построения электроприводов прокатных станов с двухзонным регулированием скорости и улучшенными энергетическими показателями / А.С. Карандаев, А.А. Радионов, В.В. Головин и др. // «Автоматизированный электропривод в XXI веке: пути развития: труды IV Международной (XV Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу (АЭП-2004). – Магнитогорск, 2004. – Ч. 2. – С. 260–264.
2. Головин, В.В. Энергосберегающие тиристорные электроприводы с автоматическим изменением координаты, регулируемой по цепи возбуждения / В.В. Головин, А.С. Карандаев, В.Р. Храмин // Изв. вузов. «Электромеханика». – 2006. – № 4. – С. 35–39.
3. Неймарк, В.Е. Методика определения динамического запаса напряжения систем стабилизации скорости электроприводов постоянного тока / В.Е. Неймарк // Электротехническая промышленность. Сер. «Электропривод». – 1971. – № 7. – С. 15–16.
4. Головин, В.В. Оценка эффективности применения тиристорного электропривода с автоматическим изменением координаты, регулируемой по цепи возбуждения. / В.В. Головин, А.С. Карандаев, В.Р. Храмин // Изв. вузов. «Электромеханика». – 2006. – № 4. – С. 40–45.

Поступила в редакцию 15.04.2009 г.

Карандаев Александр Сергеевич – доктор техн. наук, профессор, заведующий кафедрой электротехники и электротехнических систем ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет» им. Г.И. Носова. Телефон: 8-(3519) 29-84-34.

Karandaev Alexander Sergeevich – Dr. Sci. Tech., professor, superintendent faculty electrical engineers and electrotechnical systems of Magnitogorsk state technical university, Magnitogorsk. The contact phone: 8-(3519) 29-84-34.

Храмин Вадим Рифатович – канд. техн. наук, доцент кафедры электротехники и электротехнических систем ГОУ ВПО «МГТУ».

Khramshin Vadim Rifhatovich – Cand. Tech. Sci., the associate professor of electrical technology and electrotechnical systems department of MSTU.

Лукин Александр Андреевич – аспирант кафедры электротехники и электротехнических систем, ГОУ ВПО «МГТУ».

Lukin Alexander Andreevich – post-graduate student of electrical technology and electrotechnical systems department of MSTU.

Шурыгина Галина Владимировна – канд. техн. наук, доцент кафедры электротехники и электротехнических систем ГОУ ВПО «МГТУ».

Shurygina Galina Vladimirovna – Cand. Tech. Sci., the associate professor of electrical technology and electrotechnical systems department of MSTU.

Головин Вячеслав Васильевич – кандидат техн. наук, начальник центральной электротехнической лаборатории ОАО «ММК». Телефон : 8-(3519) 29-09-12.

Golovin Vyacheslav Vasiljevich – Cand. Tech. Sci., the chief of the central electrotechnical laboratory of Open joint-stock company «Magnitogorsk iron-and-steel works». The contact phone: 8-(3519) 29-09-12.