

Николаев А.А., Анохин В.В., Тулупов П.Г.

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА «ДУГОВАЯ СТАЛЕПЛАВИЛЬНАЯ ПЕЧЬ – СТАТИЧЕСКИЙ ТИРИСТОРНЫЙ КОМПЕНСАТОР»

В статье приведено подробное описание математической модели электротехнического комплекса «дуговая сталеплавильная печь – статический тиристорный компенсатор» на примере ДСП-120 и СТК-100. Модель реализована в приложении *Simulink* математического пакета *Matlab*. Разработанная модель позволяет проводить комплексные исследования электрических режимов ДСП, режимов работы системы автоматического управления перемещением электродов, а также алгоритмов управления реактивной мощностью статического тиристорного компенсатора. С целью наглядной демонстрации работы модели в рамках данного исследования получены графики: электрических характеристик ДСП-120; изменения тока электрической дуги; электрических и технологических характеристики ДСП-120 с фактическим распределением рабочих точек; суммарной мощности дуг во время перехода с одной стадии плавки на другую; реактивной мощности комплекса ДСП-120-СТК и напряжения на шинах ЗРУ-35 кВ при различных режимах регулирования ТРГ.

Ключевые слова: математическая модель, дуговая сталеплавильная печь, статический тиристорный компенсатор, система управления перемещением электродов, компенсация реактивной мощности, случайные колебания токов дуг.

ВВЕДЕНИЕ

За последние десятилетия в металлургической отрасли промышленности стран СНГ и зарубежья наблюдается активное замещение конвертерного и мартеновского производства электросталеплавильным. Данный факт обусловлен высокой экономической и энергетической эффективностью дуговых сталеплавильных печей (ДСП) и установок ковш-печь (УКП). Как показывает практический опыт, зачастую эксплуатация подобных установок осуществляется недостаточно рационально вследствие сложности физических процессов, лежащих в основе функционирования электросталеплавильного комплекса.

Исследование особенностей функционирования электросталеплавильного комплекса представляет собой трудоёмкую задачу. Режим работы ДСП достаточно сложно описать точными математическими зависимостями. Характер изменения нагрузки ДСП носит сложно предсказуемый характер, который зависит от технологических особенностей выплавки стали (качество металлолома, шихтовка плавки, работа системы управления положением электродов), а также электрических характеристик питающей сети и работы компенсатора реактивной мощности в системе электроснабжения электросталеплавильного комплекса [1]. Для дуговых печей высокой мощности с целью обеспечения электромагнитной совместимости и поддержания напряжения на первичной стороне печного трансформатора устанавливаются статические тиристорные компенсаторы (СТК). Они являются устройствами косвенной компенсации, состоящими из управляемой индуктивности – тиристорно-реакторной группы (ТРГ) и нерегулируемого источника реактивной мощности – фильтрокомпенсирующих цепей (ФКЦ), включающих в себя фильтры 2-й, 3-й и 4-й гармоник [2, 3].

Авторами статьи разработана математическая модель комплекса «ДСП-120 и СТК-100 МВАр». Данная

модель включает все основные элементы системы электроснабжения дуговой печи и её электрического контура и позволяет исследовать работу комплекса с учётом многих факторов, например параметров питающей сети, режимов работы ДСП и СТК и др.

ОПИСАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА «ДСП-120 – СТК»

Модель электротехнического комплекса «ДСП-120 – СТК» состоит из пяти основных элементов (**рис. 1**): питающая сеть 220/35 кВ и силовая часть статического тиристорного компенсатора 100 МВАр; система автоматического управления тиристорно-реакторной группой *MACH2*; электрический контур дуговой сталеплавильной печи ДСП-120; система управления перемещением электродов *HIREG Plus*; блок формирования случайных возмущений дуг.

На **рис. 1**: u_A, u_B, u_C - фазные напряжения в сети 220 кВ, В; $u_{AB}^{шин}, u_{BC}^{шин}, u_{CA}^{шин}$ - линейные напряжения на шинах закрытого распределительного устройства (ЗРУ) 35 кВ, В; $u_{шинA}, u_{шинB}, u_{шинC}$ - фазные напряжения на шинах ЗРУ-35 кВ, В; $u_{AB}^{пex}, u_{BC}^{пex}$ - линейные напряжения на первичной стороне печного трансформатора, В; $i_A^{ДСП}, i_C^{ДСП}$ - токи на первичной стороне печного трансформатора, А; $i_{сумA}, i_{сумB}, i_{сумC}$ - суммарные токи электросталеплавильного комплекса, потребляемые из питающей сети, А; $i_{нагрA}, i_{нагрB}, i_{нагрC}$ - суммарные токи ДСП и ФКЦ, А; $Q_{уст}$ - уставка регулирования ТРГ по реактивной мощности, ВАр; $U_{уст}$ - уставка регулирования ТРГ по напряжению, В; $B_{ТРГmax}$ - ограничение по максимальной проводимости ТРГ, См; $I_{AB}^1, I_{BC}^1, I_{CA}^1$ и $I_{AB}^2, I_{BC}^2, I_{CA}^2$ - отпирающие импульсы, подающиеся соответственно на прямую и обратную группы тиристорных; $u_{дA}, u_{дB}, u_{дC}$ - напряжения электрических дуг, В; $i_{дA}, i_{дB}, i_{дC}$ - токи электрических дуг, А; R'_Σ - суммарные активные сопротивления электрического контура ДСП, Ом; L'_Σ - суммарные индуктивности электрического контура ДСП, Гн; K_T - коэффициент трансформации печного трансформатора; θ_d - тепловая постоянная

времени дуги, мс; g_{d0} - начальное значение проводимости дуги в момент подачи напряжения, См; α - падение напряжения в приэлектродных областях, В; β - градиент напряжения дуги, В/мм; K_I - коэффициент, учитывающий изменение коэффициента трансформации печного трансформатора на различных ступенях РПН; K_{Iph} - коэффициент балансировки фаз, который обеспечивает ослабление (или усиление) обратной связи по току с целью изменения соотношения технологических параметров печи в одной фазе по отношению к двум другим; K_T - коэффициент трансформации печного трансформатора при 12 ступени РПН; K_U - коэффициент, определяемый текущей ступенью трансформатора, уставкой адмитанса, номером рабочей кривой, а также системой динамической компенсации колебаний напряжения питающей сети *HIREG DEC*; N_{TR} - номер ступени РПН печного трансформатора; N_{OC} - номер рабочей кривой САУ перемещением электродов; T_ϕ - постоянная времени фильтра, с; $T_{ГЦ}$ - постоянная времени гидроцилиндра, учитывающая инерционность его действия, с; K_a - коэффициент, позволяющий варьировать быстродействие контура в зависимости от ступени печного трансформатора; *Bias* - постоянный сигнал смещения; $U_{max up}$, $U_{max low}$ - верхнее и нижнее ограничения сигнала ошибки, рассчитываемой по формуле (1), мВ; $L_{дА}$, $L_{дВ}$, $L_{дС}$ - длины электрических дуг; $S(I_{дА})$, $S(I_{дВ})$, $S(I_{дС})$ - стандартные отклонения токов электрических дуг, А; $\Delta L_{дА}$, $\Delta L_{дВ}$, $\Delta L_{дС}$ - изменения длин дуг, мм.

Имитационная часть модели (рис. 2) реализована с помощью готовых блоков из библиотек, встроенных в

приложение *Simulink*, и содержит: электрическую сеть, по которой получает питание сталеплавильный комплекс, включающую понижающий трансформатор 220/35 кВ, воздушные и кабельные линии электропередачи; тиристорно-реакторную группу и фильтры высших гармоник.

Тиристорно-реакторная группа на исследуемом объекте работает под управлением САУ *MACH2* фирмы *ABB*. В системе предусмотрен расчет ортогональных составляющих токов и напряжений прямой и обратной последовательности на основании мгновенных значений, регистрируемых в различных точках комплекса. В рассматриваемой модели САУ ТРГ реализованы прямой канал управления и два канала управления с обратными связями (рис. 3). В прямом канале осуществляется симметрирование нагрузки (исключение токов обратной последовательности) путём изменения проводимости фаз ТРГ. Каналы управления с обратными связями формируют корректирующие сигналы на задания реактивных проводимостей фаз ТРГ с целью реализации заданного режима регулирования: поддержание заданной реактивной мощности или заданного напряжения на первичной стороне печного трансформатора. Суммарные величины проводимостей фаз ТРГ через блоки ограничения (с уставкой $B_{ТРГ max}$) подаются на блоки нелинейности, в которых реализована обратная регулировочная характеристика ТРГ $\alpha=f(B)$. Сигналы задания на углы отпирания тириستоров отправляются в систему импульсно-фазового управления (СИФУ) [4].

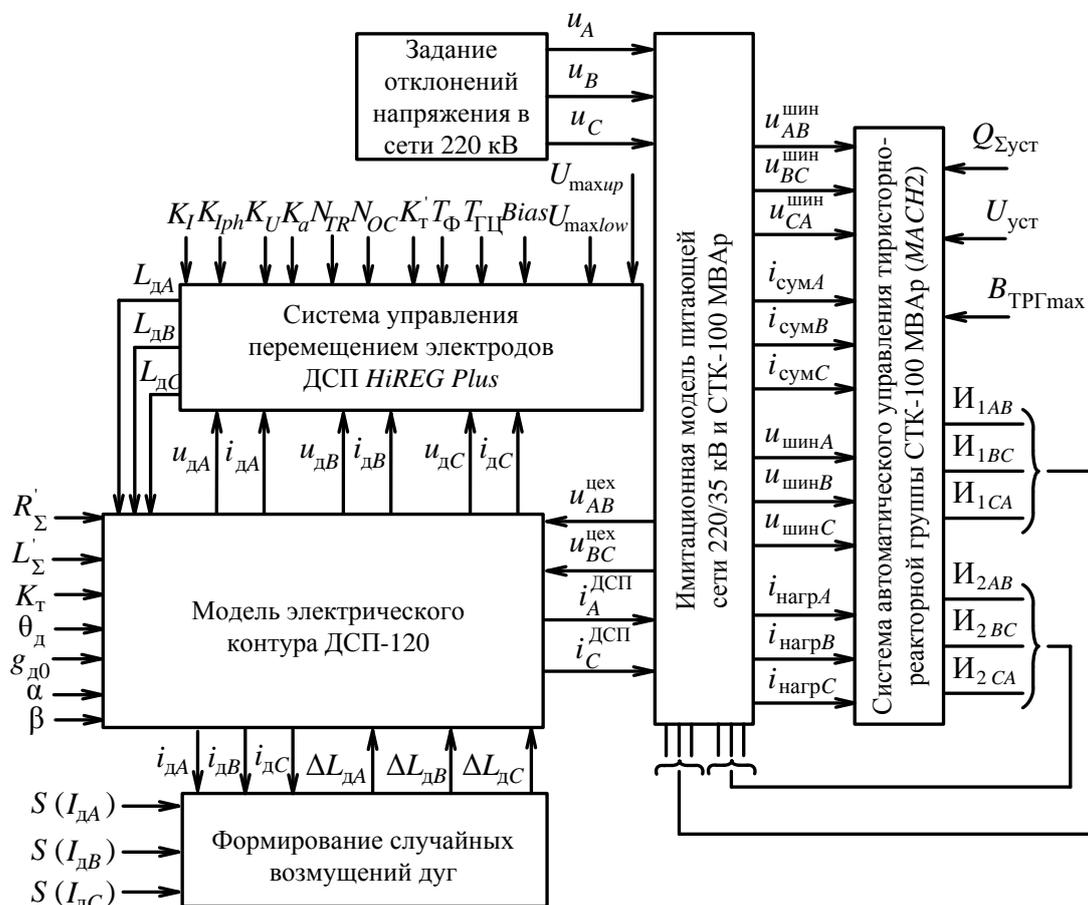


Рис. 1. Блок-схема математической модели электротехнического комплекса «ДСП-120 – СТК»

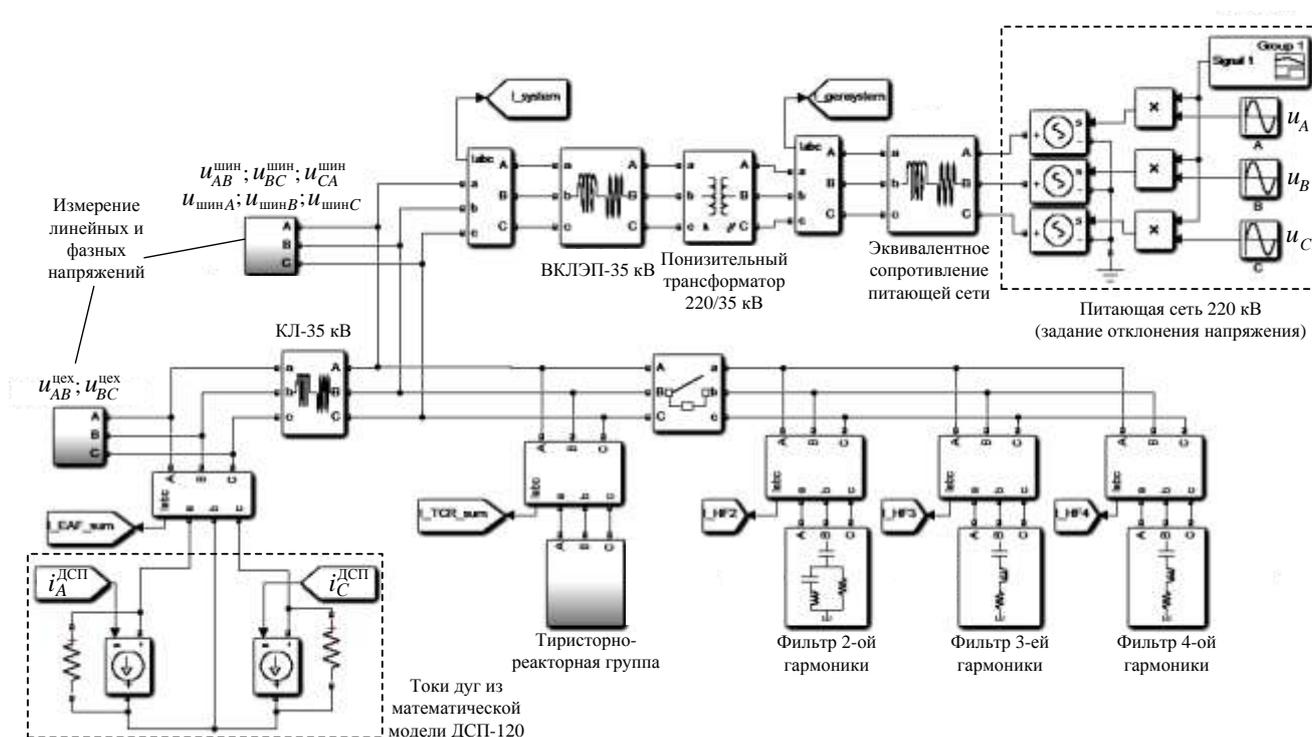


Рис. 2. Имитационная модель питающей сети 220/35 кВ и силовой части СТК-100

На выходе СИФУ формируются импульсы, которые поступают на входы управления тиристорных ключей ТРГ. Для корректной работы преобразователя координат и СИФУ предусмотрена модель фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). ФАПЧ используется для формирования синхронизированных сигналов линейных напряжений в условиях постоянно меняющихся частоты и фазы [5].

Подробное описание математической модели электрического контура дуговой сталеплавильной печи (рис. 4) приведено в работе [6]. Здесь отметим, что данная математическая модель построена на основании дифференциального уравнения мгновенной проводимости электрической дуги (уравнение Касси), а также на уравнениях, записанных в соответствии с первым и вторым законом Кирхгофа.

Для управления положением электродов на ДСП-120 применяется система *HIREG Plus (Danieli, Италия)*. Её математическая модель представлена на рис. 5.

Алгоритм управления данной системы подразумевает косвенное регулирования адмитанса электрического контура за счёт поддержания на нулевом уровне ошибки регулирования, вычисляемой по следующей формуле:

$$Error = K_I \cdot K_{Iph}^{-1} \cdot I_1 - K_U \cdot U_{2\phi}, \quad (1)$$

где I_1 – ток, измеренный на стороне высокого напряжения печного трансформатора, пропорциональный току дуги (при условии соединения обмоток по схеме $\Delta/\Delta-0$); $U_{2\phi}$ – фазное напряжение, измеренное между выводами вторичной обмотки трансформатора и подиной печи.

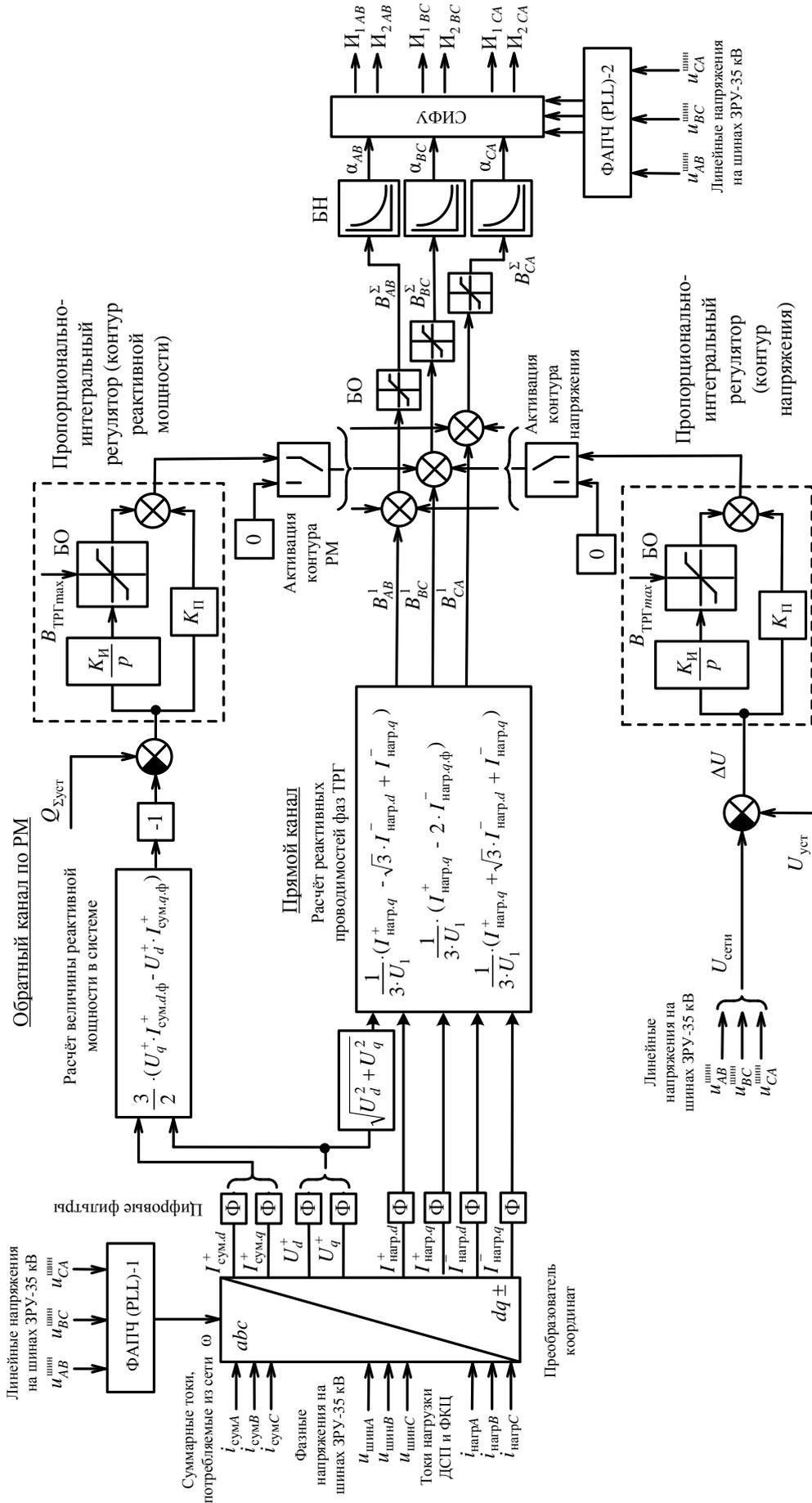
Сигнал ошибки *Error* после фильтрации поступает на вход нелинейного блока БН1. Данный блок в системе *HIREG* предназначен для обеспечения заданного быстродействия системы регулирования адмитанса для различных диапазонов ошибки регулирования, что

позволяет максимально точно обрабатывать малые перемещения, а также максимально быстро устранять режимы коротких замыканий [7]. Сформированный в результате работы всех вышеприведённых функциональных блоков сигнал необходимо ограничить. Это позволит привести величину сигнала ошибки в соответствие диапазону управляющего сигнала сервоклапана (от -10000 до 10000 мВ) [8, 9].

Поскольку характеристика сервоклапана является нелинейной и несимметричной относительно начала координат, в системе *HIREG* производится процедура линеаризации данной характеристики с помощью блока БН2 (см. рис. 5). Под линеаризацией понимается обеспечение линейности и симметрии в диапазоне $\pm 30\%$ от максимальной величины сигнала задания. Данный диапазон определяет границы эффективной зоны характеристики сервоклапана [10].

Для исследования особенностей работы электросталеплавильного комплекса с учётом таких факторов, как изменение напряжения в сети и характер горения дуг ДСП, в данной модели предусмотрены блоки задания отклонений напряжения в питающей сети 220 кВ и формирования случайных возмущений токов дуг.

Перед реализацией модели формирования случайных возмущений дуг (рис. 6) выполнен статистический анализ графиков изменения действующих значений токов дуг. На основании 100-секундных интервалов со стационарным (эргодическим) характером изменения тока получены автокорреляционные функции и функции спектральной плотности, которые содержат в себе информацию о частотном спектре случайных колебаний токов. Используя специализированные формирующие фильтры совместно с генератором белого шума, разработаны блоки формирования случайных возмущений. Сигналы на выходе формирующих фильтров $\Delta I_{дА}$, $\Delta I_{дВ}$, $\Delta I_{дС}$ соответствуют случайной составляющей колебаний токов дуг.



Обратный канал по напряжению

Рис. 3. Функциональная схема системы автоматического управления тиристорно-реакторной группы (B_{AB}¹, B_{BC}¹, B_{CA}¹ – проводимости фаз ТРГ прямого канала, См; БО – блоки ограничения; БН – блоки нелинейности)

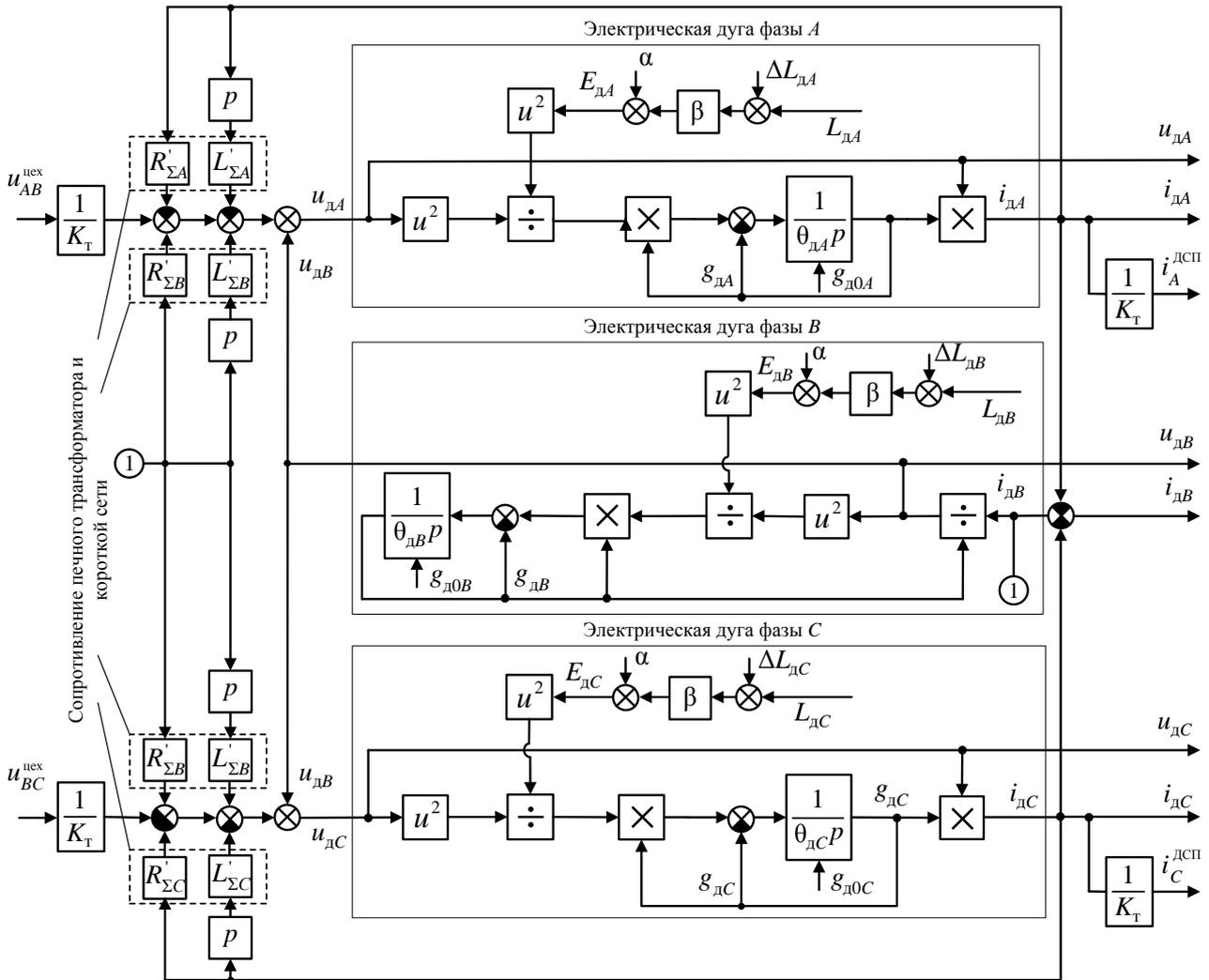


Рис. 4. Структурная схема электрического контура ДСП-120 ($g_{дA}, g_{дB}, g_{дC}$ – мгновенные проводимости дуг, См; $E_{дA}, E_{дB}, E_{дC}$ – противо ЭДС дуг, В)

Для полной реализации случайных возмущений необходимо получить сигналы изменений длин дуг $\Delta L_{дA}, \Delta L_{дB}, \Delta L_{дC}$. Для этого на математической модели получена характеристика $K_d=f(I_d)$ (блоки БН) путём дифференцирования зависимости $L_d=f(I_d)$. В данном случае K_d – коэффициент пропорциональности между возмущающим воздействием по длине дуги ΔL_d и возмущающим воздействием по току дуги I_d при заданном I_d [11].

ПРИМЕНЕНИЕ РАЗРАБОТАННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

В РАЗЛИЧНЫХ ТИПАХ ИССЛЕДОВАНИЙ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА «ДСП – СТК»

Как уже было сказано выше, разработанная модель электросталеплавильного комплекса позволяет решать широкий спектр задач. В качестве примера на рис. 7 приведены электрические и технологические характеристики ДСП-120 (85 МВА), такие как: зависимости мощности дуг $P_d=f(I_d)$, коэффициентов износа футеровки $KIF=f(I_d)$ и интенсивности нагрева $KIH=f(I_d)$ для фактического и номинального значения напряжения питающей сети, которое, в свою очередь, напрямую зависит от режима работы СТК. На расчетные характеристики нанесены фактические распределения рабочих точек, полученные из архивных файлов сис-

темы *HIREG Plus*. Данные характеристики построены для двух технологических режимов работы печи: 1) стадия расплавления шихты при холодном старте (рис. 7, а); 2) стадия расплавления при непрерывной подаче шихты при помощи конвейера с использованием технологии *Consteel* (рис. 7, б). В последнем режиме электрические дуги всегда горят в условиях наличия жидкой ванны.

Использование математической модели в данном случае позволяет проводить оценку оптимальности положения средней рабочей точки на электрических и технологических характеристиках ДСП. В первом случае электрический режим дуговой печи является неоптимальным из-за низких значений КИФ и $\cos\varphi$ (рис. 7, а). Также в данном случае из-за высоких значений отклонений P_d и I_d требуется коррекция параметров нелинейного регулятора системы управления перемещением электродов ДСП. Во втором случае электрические и технологические показатели ДСП находятся в норме, электрический режим является оптимальным.

Кроме построения статических характеристик, с помощью разработанной модели можно анализировать работу системы управления перемещением электродов в динамических режимах. На рис. 8 представлены графики изменения суммарной мощности электрических

дуг при переходе с одной ступени печного трансформатора на другую при соответствующем изменении значения уставки на адмитанс фазы $Y_{зад}$. При проведении данных исследований возможно оценивать эффективность настройки коэффициентов нелинейного регулятора и при необходимости осуществлять выбор наиболее оптимальной формы нелинейной характеристики, обеспечивающей достижение минимальных значений стандартных отклонений токов и мощностей дуг.

Другим видом исследований является анализ характера изменения напряжения на шинах ЗРУ-35 кВ и суммарного потребления реактивной мощности комплексом «ДСП-СТК» при различных режимах работы статического тиристорного компенсатора и различном отклонении напряжения во внешней питающей сети. На рис. 9 изображены графики изменения напряжения на шинах ЗРУ-35 кВ и величины суммарной реактивной мощности комплекса ДСП-120-СТК при двух режимах работы ТРГ.

При проведении исследований анализировались два возможных режима работы системы управления ТРГ СТК: 1) режим поддержания нулевой реактивной мощности комплекса «ДСП-СТК» (рис. 9, а); 2) режим

поддержания номинального напряжения на секции 35 кВ, от которой получают питание объекты электросталеплавильного комплекса (рис. 9, б). В первом случае из-за непостоянства напряжения во внешней сети 220 кВ имеют место отклонения напряжения в точке подключения комплекса, во втором случае возникает обратная картина: напряжение сети поддерживается на номинальном уровне за счет изменяющегося характера реактивной мощности комплекса «ДСП-СТК». Применение математической модели позволяет определить наиболее оптимальный режим в зависимости от величины отклонения напряжения во внешней питающей сети. При достаточно стабильном напряжении в сети 220 кВ режим поддержания нулевой реактивной мощности является наиболее предпочтительным, поскольку в этом случае достигаются наилучшие энергетические показатели комплекса. В условиях сильных отклонениях напряжения во внешней сети в периоды максимальных суточных нагрузок необходимо использовать режим поддержания напряжения для исключения снижения напряжения на секции 35 кВ, сопровождающегося потерей производительности ДСП.

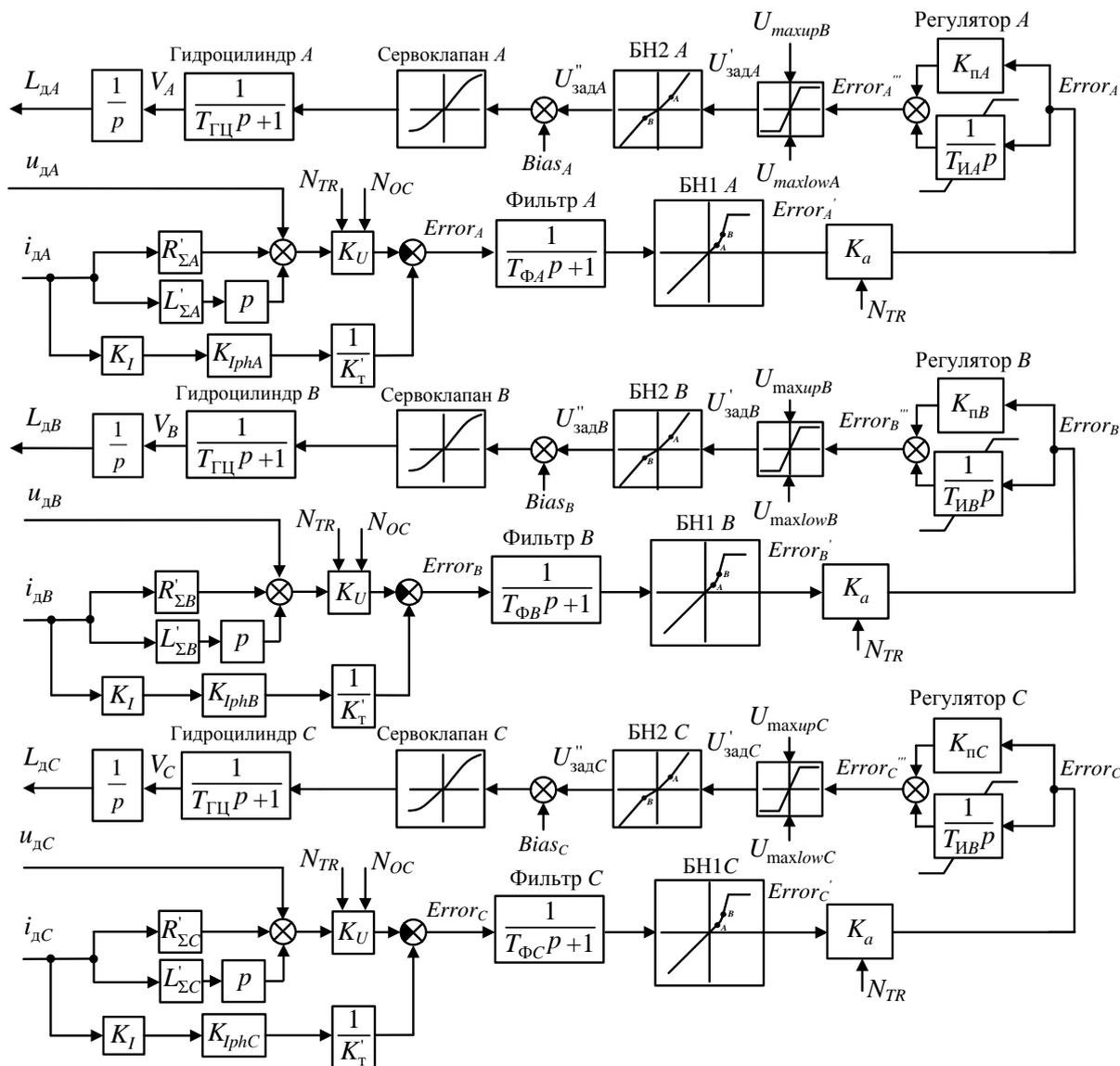


Рис. 5. Математическая модель системы автоматического управления перемещением электродов (V_A, V_B, V_C – скорости перемещения электродов)

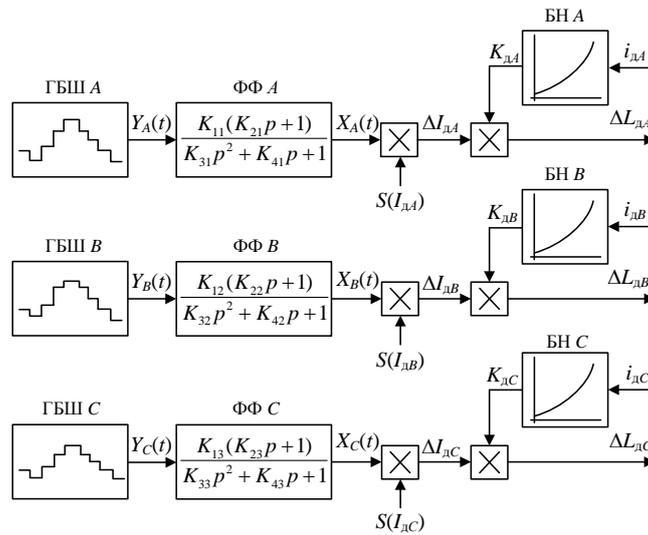


Рис. 6. Модель формирования случайных возмущений дуг ДСП-120 (ГБШ – генераторы белого шума; ФФ – формирующие фильтры; БН – блоки нелинейности; $\Delta I_{дА}$, $\Delta I_{дВ}$, $\Delta I_{дС}$ - колебания токов дуг, А)

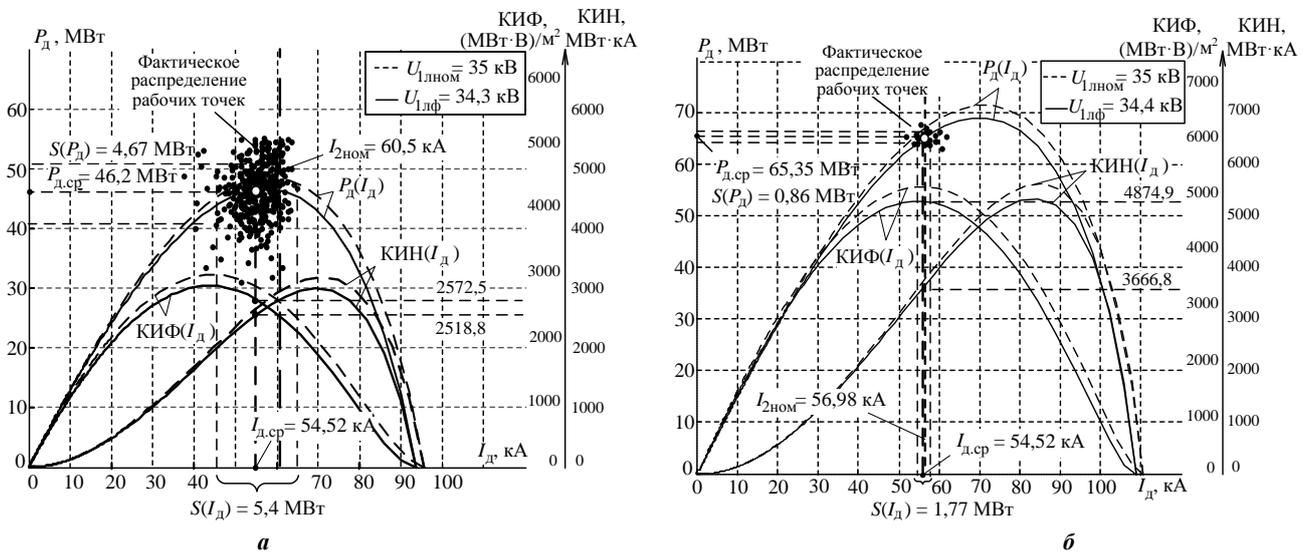


Рис. 7. Электрические и технологические характеристики ДСП-120 с фактическим распределением рабочих точек: а – холодный старт печи на стадии расплавления шихты; б – конечная стадия плавки при непрерывной подаче шихты с помощью конвейера (технология Consteel)

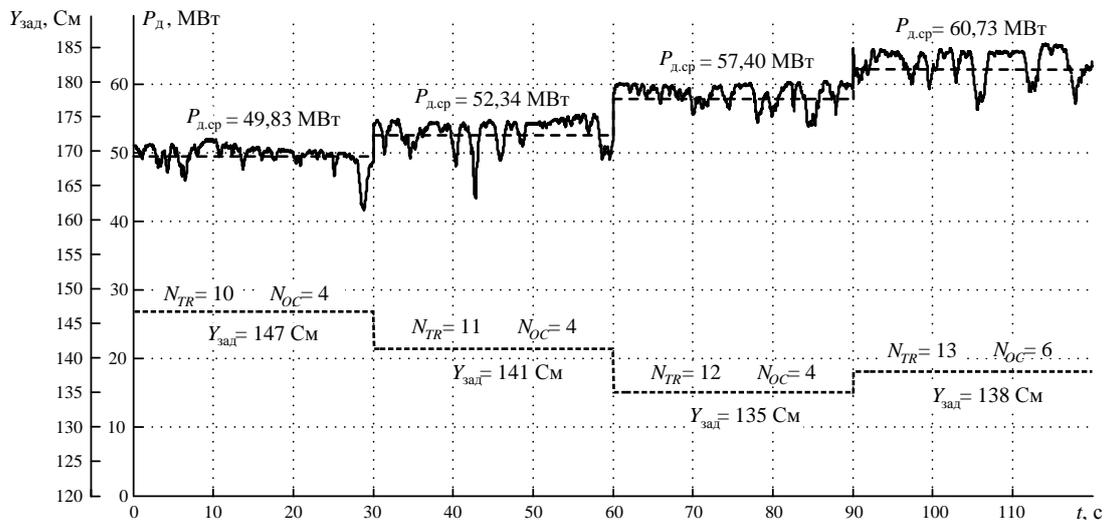


Рис. 8. График суммарной мощности дуг, полученный на модели для времени перехода с одной стадии плавки на другую ($Y_{зад}$ - уставка по адмитансу; N_{TR} - номер ступени печного трансформатора; N_{OC} - номер рабочей кривой)

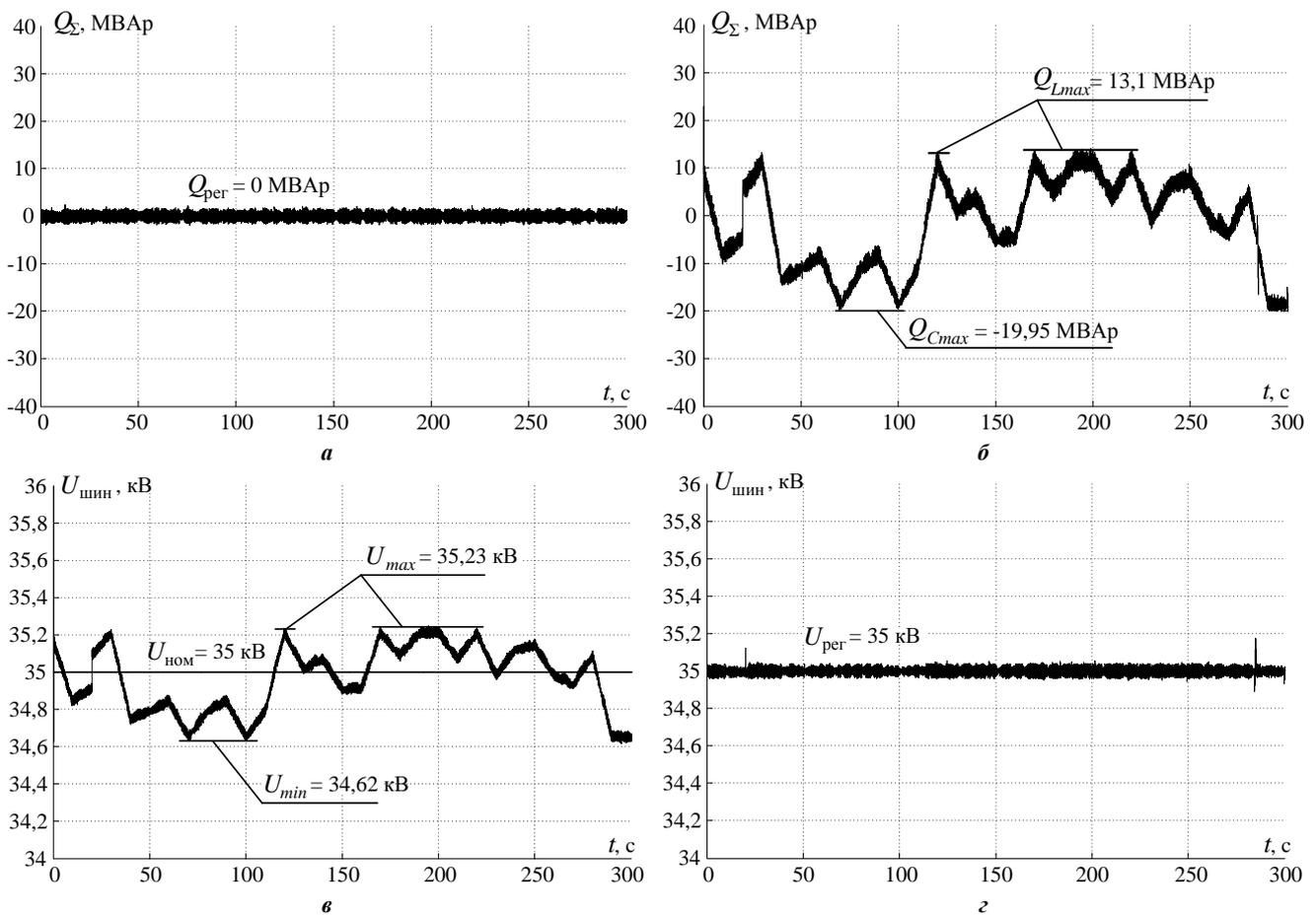


Рис. 9. Графики реактивной мощности комплекса ДСП-120-СТК и напряжения на шинах ЗРУ-35 кВ при режимах регулирования ТРГ: а-б – по реактивной мощности; в-г – по напряжению

Помимо вышесказанного, по мгновенным значениям линейных напряжений, записанным в какой-либо анализируемой точке модели, возможно проведение исследования соответствия качества электроэнергии нормативным значениям для различных стадий плавки ДСП, режимов работы СТК и параметров питающей сети [12-16]. На рис. 10 приведены графики изменения основных электрических параметров комплекса «ДСП-СТК» при различных режимах работы компенсатора реактивной мощности, рассчитанные на математической модели. Как видно рис. 10, снижение напряжения на шинах 35 кВ при отключенном СТК составляет 7,5 %, поэтому активная мощность, вводимая в печь, снижается примерно на 21 % (с 60 до 47,4 МВт) при отключенном СТК, что негативно сказывается на производительности ДСП. Коэффициент загрузки трансформатора, равный отношению фактической полной мощности к номинальной ($K_3 = S_{ДСП}/S_{НОМ}$), уменьшается на 27 %, с 1 до 0,73. Наряду с ухудшением энергетических показателей ДСП отключение СТК отрицательно сказывается на основных показателях качества напряжения в точке присоединения комплекса – увеличивается на 2,2 % содержание высших гармоник в питающем напряжении и растет коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} (+0,5 %).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана математическая модель электротехнического комплекса «ДСП-СТК», включающая в себя все наиболее важные структурные компоненты, такие как питающая сеть 220/35 кВ с силовой частью статического тиристорного компенсатора 100 МВАр, система автоматического управления ТРГ, электрический контур ДСП, а также система управления перемещением электродов *HIREG Plus* с реализацией блока формирования случайных возмущений дуг.

2. Основным преимуществом разработанной модели является возможность решения широкого спектра как исследовательских, так и прикладных задач, связанных с оптимизацией электрических режимов работы ДСП, выявлением энергетических резервов, оценкой качества регулирования системы управления перемещением электродов, а также анализом работы комплекса при различных режимах работы статического тиристорного компенсатора.

3. Разработанная модель является универсальной и позволяет осуществлять комплексный анализ работы объекта при различных: технологических режимах работы печи (холодный старт и режим работы при непрерывной подаче шихты с помощью конвейера); ступенях печного трансформатора, реактора и рабочих кривых; режимах регулирования ТРГ. Благодаря этому появляется возможность оценки параметров, характерных как для конкретных стадий, так и для всей плавки в целом.

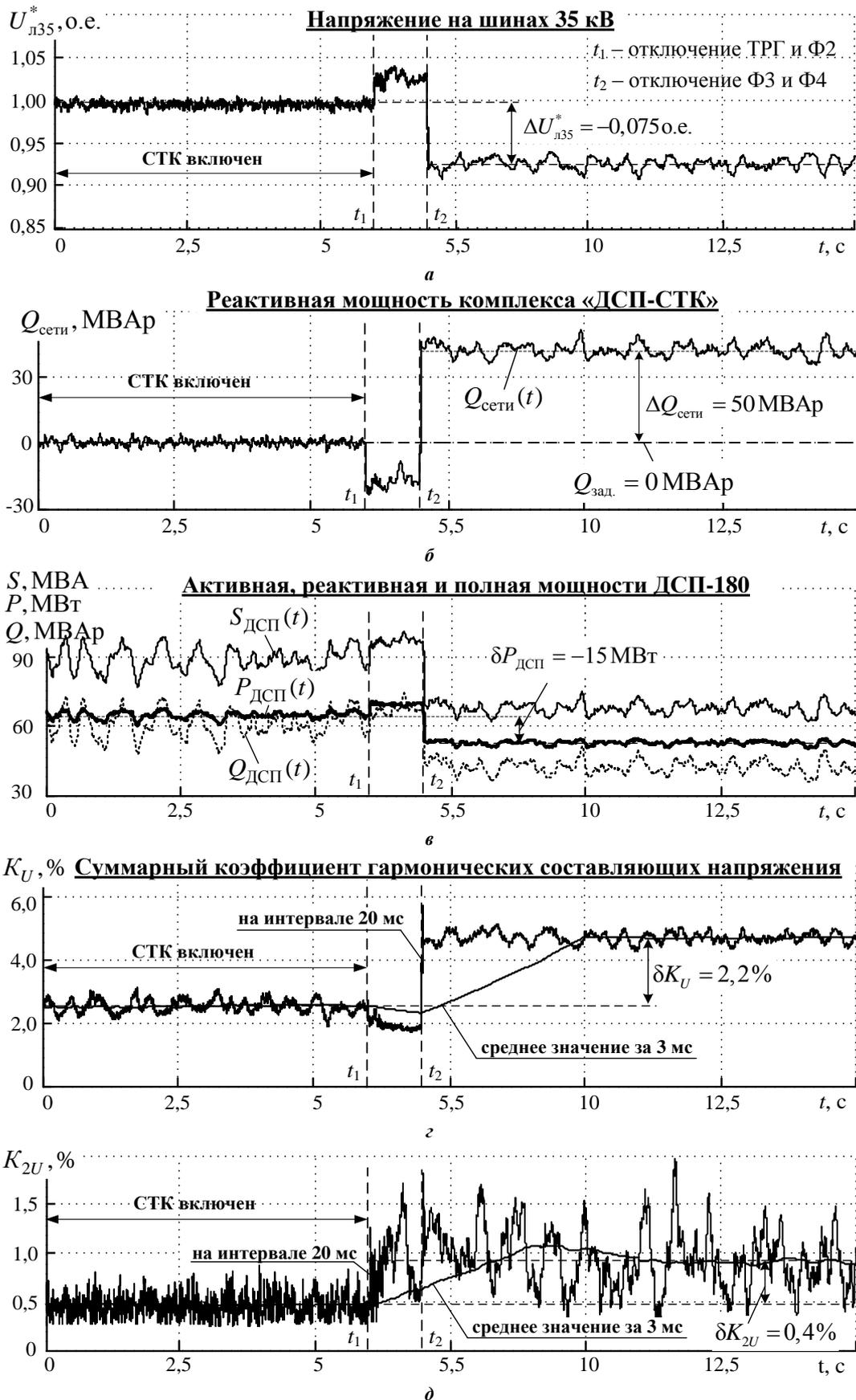


Рис. 10. Графики изменения параметров комплекса «ДСП-СТК» при различных режимах СТК, полученные на разработанной математической модели

($U_{л35}^*$ – действующее значение линейного напряжения на секции 35 кВ в относительных единицах; $Q_{сети}$ – реактивная мощность комплекса «ДСП-СТК»; S , P , Q – полная, активная и реактивная мощности комплекса «ДСП-СТК»; K_U – суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения; K_{2U} – коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электротехнологические промышленные установки: учебник для вузов / И.П. Евтюкова, Л.С. Кацевич, Н.М. Некрасова, А.Д. Свенчанский. М.: Энергоиздат, 1982. 400 с.
2. Кочкин В.И., Нечаев О.П. Применение статических компенсаторов реактивной мощности в электрических сетях энергосистем и предприятий. М.: Изд-во «НЦ ЭНАС», 2002. 247 с.
3. Hingorani, N.G., Gyugyi L. Understanding FACTS. Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems. New York: IEEE Press book, 2000. 444 p.
4. Gyugyi, L., Otto R.A., Putman T.H. Principles and applications of static, thyristor controlled shunt compensators // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-97, no. 5, 1978, pp. 1935-1945.
5. Корнилов Г.П., Николаев А.А., Храмин Т.Р. Моделирование электротехнических комплексов промышленных предприятий. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. 239 с.
6. Николаев А.А. Повышение эффективности работы статического тиристорного компенсатора сверхмощной дуговой сталеплавильной печи: дис. ... канд. техн. наук. Магнитогорск МГТУ им. Г.И. Носова, 2009. 204 с.
7. Kawamura A. An Optimal Control Method Applied for the Compensation of the Fundamental VAR Fluctuations in the Arc Furnace // IEEE Transactions of Industry Applications. 1983, vol. 1A-19, iss. 3. pp. 414-423. doi: 10.1109/ТIA.1983.4504217
8. Свенчанский А.Д. Автоматическое управление электротермическими установками: учебник для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1990. 416 с.
9. Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Ахметов У.Б. Оптимизация управления технологическими процессами в металлургии: монография. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2006. 198 с.
10. Yuhua W., Jianlin M. Electrode regulator system for ore smelting electric arc furnace based on active disturbance rejection control technology // Advanced Computer Control (ICACC), 2010 2nd International Conference (27-29 March 2010). 2010, vol. 2, pp. 109-113. doi: 10.1109/ICACC.2010.5487195
11. Математическая модель электрического контура дуговой сталеплавильной печи с реализацией случайных возмущений электрических дуг / А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, А.В. Ануфриев, Е.В. Повелица // Приложение математики в экономических и технических исследованиях. 2014. №4(4). С. 260-271.
12. Пути совершенствования динамических характеристик дуговых сталеплавильных печей / И.А. Якимов, А.А. Николаев, Д.А. Корнилов, Г.П. Корнилов, А.В. Ануфриев, В.С. Горбунов, Е.В. Прудников // Электротехнические системы и комплексы. 2010. № 1. С. 233.
13. Особенности электроснабжения металлургического завода «ММК-МЕТАЛУРЖ» / Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, А.В. Ануфриев, И.А. Ложкин, В.С. Ивекеев, Е.Б. Славгородский // Электротехнические системы и комплексы. 2012. № 20. С. 235-238.
14. Ограничение провалов напряжения в системах электроснабжения промышленных предприятий / Г.П. Корнилов, А.Ю. Коваленко, А.А. Николаев, И.Р. Абдулвелеев, Т.Р. Храмин // Электротехнические системы и комплексы. 2014. № 2 (23). С. 44-48.
15. Исследование влияния провалов напряжения в системе электроснабжения завода «ММК-МЕТАЛУРЖ» на работу главных электроприводов стана горячей прокатки / А.А. Николаев, А.С. Денисевич, И.А. Ложкин, М.М. Тухватуллин // Электротехнические системы и комплексы. 2015. № 3 (28). С. 8-14.
16. Николаев А.А., Тулупов П.Г. Разработка усовершенствованных алгоритмов управления гидроприводом перемещения электродов сверхмощной электродуговой сталеплавильной печи ДСП-250 // Электротехнические системы и комплексы. 2015. № 3 (28). С. 20-27.

Поступила в редакцию 14 июня 2016 г.

INFORMATION IN ENGLISH

DESIGN OF MATHEMATICAL MODEL OF ELECTROTECHNICAL COMPLEX "ELECTRIC ARC FURNACE – STATIC VAR COMPENSATOR"

Alexander A. Nikolaev

Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Head of the department, Department of Automatic Electric Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: alexniko@inbox.ru.

Vasily V. Anokhin

Undergraduate, the department of Power Supply Systems of Industrial Enterprises, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: anohinvasilii@mail.ru.

Platon G. Tulupov

Undergraduate, the department of Automatic Electric Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: tulupov.pg@mail.ru.

The article is concerned with detailed description of the mathematical model of electrotechnical complex «Electric arc furnace – static var compensator». We chose an electric arc furnace EAF-120 (85 MVA) and SVC-100 Mvar as an object of this research. The model was designed with Simulink Matlab application and makes it possible to provide the wide range of research aimed at analysis of the EAF electrical modes and algorithms of reactive power control for SVC. To demonstrate the possibilities of model, the following graphs were obtained for: electrical characteristics of EAF-120; electric arc current

oscillations in the phase "A"; electrical and technological characteristics of EAF-120 with distribution of operating points; total electric arc power during the transition from one heating stage to another; reactive power of the electrotechnical complex EAF-120 – SVC and voltage on the bus bars of indoor switchgear for different regulating modes of the thyristor-controlled reactor.

Keywords: Mathematical model, electric arc furnace, static var compensator, electrode position control system, reactive power compensation, arc currents random disturbances.

REFERENCES

1. Evtyukova I.P., Katsevich L.S., Nekrasova N.M., Svenchanskiy A.D. *Elektrotekhnologicheskie promyshlennye ustanovki* [Industrial Electrotechnological Installations]. Moscow, Energoizdat Publ., 1982, 400 p.
2. Kochkin V.I., Nechaev O.P. *Primenenie staticheskikh kompensatorov reaktivnoy moshchnosti v elektricheskikh setyakh energosistem i predpriyatiy* [Application of Static var Compensator in Electric Networks of Power Supply and Enterprises], Moscow, NTs ENAS Publ., 2002. 247 p.
3. Hingorani, N.G., Gyugyi L. *Understanding FACTS. Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*. New York, IEEE Press book, 2000, 444 p.
4. Gyugyi, L., Otto R.A., Putman T.H. Principles and applications of static, thyristor-controlled shunt compensators, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-97, no. 5, 1978, pp. 1935-1945.
5. Kornilov G.P., Nikolaev A.A., Khramshin T.R. *Modelirovanie elektrotekhnicheskikh kompleksov promyshlennykh predpriyatiy* [Mathematical Modeling of the Industrial Plants Electrotechnical Complexes], training manual. Magnitogorsk, Nosov MSTU Publ., 2014, 239 p.
6. Nikolaev A.A. *Povyshenie effektivnosti raboty staticheskogo tiristorного kompensatora sverkhmoshchnoy dugovoy staleplavilnoy pechi* [Improvement of Efficiency of Static Var Compensator of Ultra-High Power Electric Arc Furnace. Ph.D. Diss.], Magnitogorsk, Nosov MSTU, 2009, 204 p.
7. Kawamura A. An Optimal Control Method Applied for the Compensation of the Fundamental VAR Fluctuations in the Arc Furnace, *IEEE Transactions of Industry Applications*, 1983, vol. 1A-19, iss. 3, pp. 414-423. doi: 10.1109/TIA.1983.4504217
8. Svenchanskiy A.D. *Avtomaticheskoe upravlenie elektrotermicheskimi ustanovkami* [Electrothermal Equipment Automated Control]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990, 416 p.
9. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Akhmetov U.B. *Optimizatsiya upravleniya tekhnologicheskimi protsessami v metallurgii* [Optimization of Technological Process Control in Metallurgy]: monograph. Magnitogorsk: Nosov MSTU Publ., 2006, 198 p.
10. Yuhua W., Jianlin M. Electrode regulator system for ore smelting electric arc furnace based on active disturbance rejection control technology. *Advanced Computer Control (ICACC)*, 2010 2nd International Conference (27-29 March 2010), 2010, vol. 2, pp. 109-113. doi: 10.1109/ICACC.2010.5487195
11. Nikolaev A.A., Kornilov G.P., Anufriev A.V., Povelitsa E.V. Mathematical Model of Electric Arc Furnaces Electric Circuit with Realization of Electric Arcs Random Disturbances. *Prilozhenie matematiki v ekonomicheskikh i tekhnicheskikh issledovaniyakh* [Application of Mathematics in Economic and Technical Investigations], 2014, no. 4(4), pp. 260-271. (In Russian)
12. Yakimov I.A., Nikolaev A.A., Kornilov D.A., Kornilov G.P., Anufriev A.V., Gorbunov V.S., Prudnikov E.V. Ways of Improvement of Arc-Furnaces Dynamic Characteristics. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2010, no. 1, pp. 233. (In Russian)
13. Kornilov G.P., Nikolaev A.A., Anufriev A.V., Lozhkin I.A., Ivekeev V.S., Slavgorodskiy E.B. Special aspects of metallurgical plant MMK-METALURJI electric power supply. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2012, no. 20, pp. 235-238. (In Russian)
14. Kornilov G.P., Kovalenko A.Yu., Nikolaev A.A., Abdulvelev I.R., Khramshin T.R. Limitation of voltage drops in power supply systems of enterprises. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2014, no. 2 (23), pp. 44-48. (In Russian)
15. Nikolaev A.A., Denisevich A.S., Lozhkin I.A., Tukhvatullin M.M. Investigation of voltage drops' influence in the power supply system of the "MMK Metalurji" ironworks on the main electric drives of the hot strip mill. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2015, no. 3 (28), pp. 8-14. (In Russian)
16. Nikolaev A.A., Tulupov P.G. Development of the improved control algorithms for ultra-high power electric arc furnace EAF-250 electrode motion system. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2015, no. 3 (28), pp. 20-27. (In Russian)

Николаев А.А., Анохин В.В., Тулупов П.Г. Разработка математической модели электротехнического комплекса «дуговая сталеплавильная печь – статический тиристорный компенсатор» // *Электротехнические системы и комплексы*. 2016. №4(33). С.61-71. doi: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-61-71

Nikolaev A.A., Anokhin V.V., Tulupov P.G. Design of Mathematical Model of Electrotechnical Complex "Electric Arc Furnace – Static Var Compensator". *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2016, no.4(33), pp. 61-71. (In Russian). doi: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-61-71