

АНАЛИЗ ВАРИАНТА РЕГУЛИРОВАНИЯ ТОКА С ДВУМЯ РЕГУЛЯТОРАМИ В МОЩНЫХ ТИРИСТОРНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ ПРОКАТНЫХ СТАНОВ

ANALYSIS OF A VARIANT OF CURRENT REGULATION WITH TWO REGULATORS IN HIGH-POWER THYRISTOR ELECTRIC DRIVES OF ROLLING MILLS

Валерий Иванович Зеленцов Valery Ivanovich Zelentsov

кандидат технических наук, доцент

v.zelentsov@gmail.com

ФГАОУ ВО «Российский государственный профессионально-педагогический университет», Россия, Екатеринбург

Russian State Vocation Pedagogical University, Russia, Yekaterinburg

Владимир Владимирович Ипполитов Vladimir Vladimirovich Ippolitov

старший преподаватель

suchi6624@yandex.ru

ФГАОУ ВО «Российский государственный профессионально-педагогический университет», Россия, Екатеринбург

Russian State Vocation Pedagogical University, Russia, Yekaterinburg

Аннотация. Представленный материал посвящен анализу качества регулирования координат (тока, момента, скорости) в мощных тиристорных электроприводах постоянного тока (мощностью более 2000 кВт), выполненных с использованием эквивалентных 12-пульсных тиристорных преобразователей при параллельном включении вентильных секций через токоограничивающие дроссели и трехобмоточный силовой трансформатор. Рассмотрен вариант с индивидуальными регуляторами тока для каждой вентильной секции. В результате моделирования в среде Simulink и анализа, приведена оценка динамических показателей рассматриваемой системы. Даны рекомендации по применению варианта с индивидуальными регуляторами для каждой вентильной секции контуров регулирования тока (момента) электроприводов для прокатных станков.

Ключевые слова: электропривод, регулятор тока, тиристорный преобразователь, вентильная секция, двигатель постоянного тока, система автоматического регулирования скорости, контур регулирования тока.

Abstract. The presented material is devoted to the analysis of the quality of coordinate regulation (current, torque, speed) in high-power DC thyristor electric drives (with a capacity of more than 2000 kW), made using equivalent 12-pulse thyristor converters with

parallel switching of valve sections through current-limiting chokes and a three-winding power transformer. A variant with individual current regulators for each valve section is considered. As a result of Simulink modeling and analysis, an assessment of the dynamic indicators of the system under consideration is given. Recommendations are given on the use of a variant with individual regulators for each valve section of the current (torque) control circuits of electric drives for rolling mills.

Keywords: electric drive, current regulator, thyristor converter, valve section, DC motor, automatic speed control system, current control circuit.

Опыт наладки мощных тиристорных электроприводов с использованием эквивалентных 12-пульсных тиристорных преобразователей с параллельным включением реверсивных вентильных секций через токоограничивающие реакторы, запитанных от трехобмоточного силового трансформатора (см. рис. 1), на станах холодной прокатки, трубных станах показал, что в ряде случаев не удается достигнуть требуемого быстродействия САР тока (момента) и скорости. На рисунке 1: Тр — трехобмоточный трансформатор, вторичные обмотки соединены соответственно в звезду и треугольник. СВ₁, СВ₂ — реверсивные вентильные секции. Др₁, Др₂ — уравнивающие реакторы, включенные последовательно с вентильными секциями. Д — двигатель постоянного тока, Др — дроссель, включенный последовательно с якорем двигателя.

В отечественной практике широкое распространение получили тиристорные преобразователи, в которых силовая часть выполнена на отечественном оборудовании, а система управления — на зарубежном оборудовании, например, с использованием модуля управления Sinamics SM фирмы Siemens [4]. Такие модули обладают достаточно большими функциональными возможностями. Для управления вентильными секциями реализуется вариант использования отдельных регуляторов тока для каждой вентильной секции.

Для анализа вариантов САР скорости с двумя регуляторами тока использована линейная модель тиристорного преобразователя без учета его дискретности [2,6]. На рисунке 2 приведена расчетная схема САР скорости с двумя регуляторами тока. На рисунке 2: Ed₁, Ed₂ — ЭДС первой и второй вентильных секций, ДТ₁, ДТ₂ — датчики тока вентильных секций, РТ₁, РТ₂ — регуляторы токов вентильных секций,

РС — регулятор скорости, i_1, i_2 — токи вентильных секций, $i_я$ — ток якоря двигателя, i_3 — задание тока, $\Omega_д$ — скорость двигателя, Ω_3 — задание скорости двигателя, $R_т$ — активное сопротивление фазы трансформатора, приведенное к вторичной обмотке, R_x — фиктивное сопротивление, обусловленное процессом коммутации вентилей, R_p — активное сопротивление уравнивающего реактора вентильной секции, $R_я$ — активное сопротивление якоря двигателя, L_p — индуктивность уравнивающего реактора вентильной секции, $L_я$ — индуктивность якоря двигателя, $E_я$ — ЭДС якоря двигателя.

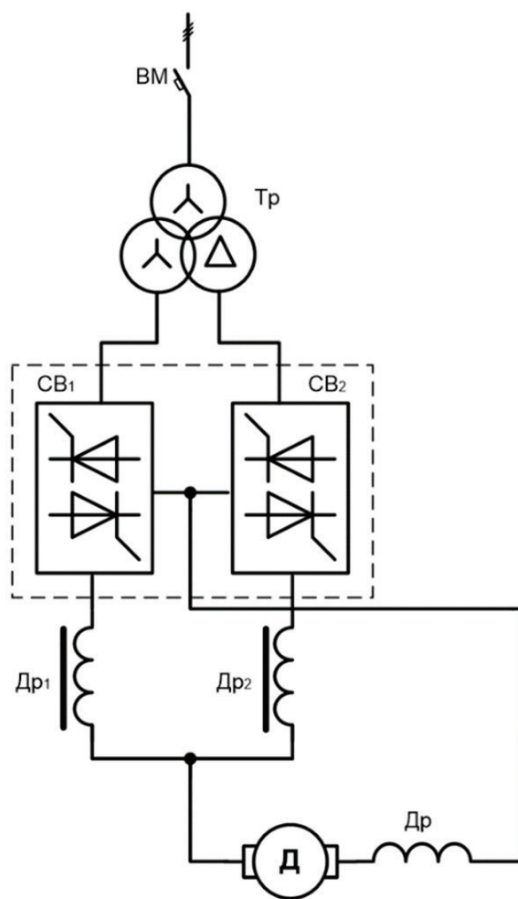


Рис. 1. Принципиальная схема силовой части тиристорного электропривода

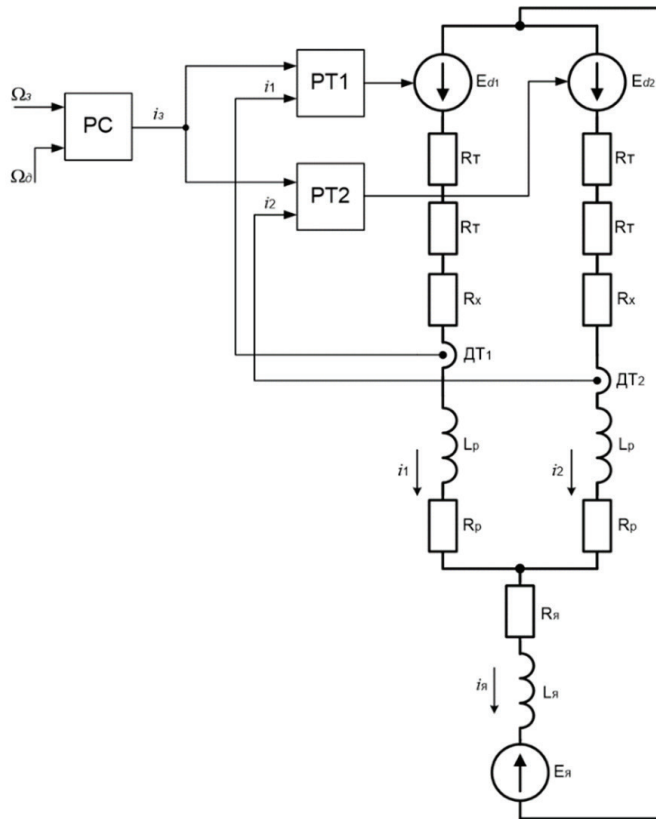


Рис. 2. Расчетная схема системы автоматического регулирования скорости

На основании расчетной схемы составлены уравнения Кирхгофа для якорной цепи двигателя:

$$E_{d1} = i_1 \cdot (2R_T + R_X + R_P + R_я) + \frac{di_1}{dt} \cdot (2L_T + L_P + L_я) + i_2 \cdot R_я + \frac{di_2}{dt} \cdot L_я + E_я ; \quad (1)$$

$$E_{d2} = i_2 \cdot (2R_T + R_X + R_P + R_я) + \frac{di_2}{dt} \cdot (2L_T + L_P + L_я) + i_1 \cdot R_я + \frac{di_1}{dt} \cdot L_я + E_я ; \quad (2)$$

$$i_я = i_1 + i_2 \quad (3)$$

Обозначив $2R_T + R_X + R_P + R_я = R_{яц}$ — сопротивление якорной цепи двигателя, $2L_T + L_P + L_я = L_{яц}$ — индуктивность якорной цепи двигателя, $L_{яц}/R_{яц} = T_{яц}$ — постоянная времени якорной цепи двигателя, $L_я/R_я = T_я$ — постоянная времени якоря двигателя, запишем уравнения (1), (2) в операторной форме [1,2]:

$$E_{d1} = i_1 \cdot R_{яц} (1 + T_{яц} p) + i_2 \cdot R_я \cdot (1 + T_я p) + E_я ; \quad (4)$$

$$E_{d2} = i_2 \cdot R_{яц} (1 + T_{яц} p) + i_1 \cdot R_я \cdot (1 + T_я p) + E_я \quad (5)$$

На основе расчетной схемы на рисунке 2 и уравнений (4), (5) составлена структурная схема САУ скорости с двумя регуляторами тока вентильных секций (см. рис. 3).

На рисунке 3: $W_{PT1}(p)$, $W_{PT2}(p)$ — передаточные функции регуляторов тока РТ1 и РТ2, $W_{PC}(p)$ — передаточная функция регулятора скорости, $K_{тп}$ — коэффициент усиления вентильной секции тиристорного преобразователя. T_j — механическая постоянная электропривода, T_{μ} — некомпенсированная малая постоянная времени контура регулирования тока, характеризующая его полосу пропускания.

Параметры и переменные на структурной схеме представлены в относительных единицах. В качестве базовых величин приняты номинальные параметры двигателя: I_H — номинальный ток,

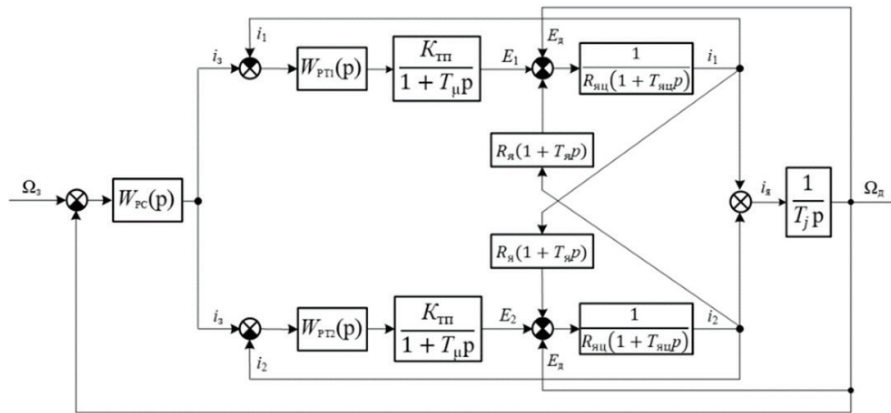


Рис. 3. Структурная схема системы автоматического регулирования скорости

Ω_n — номинальная скорость, Φ_n — номинальный поток двигателя, E_n — номинальная ЭДС, $R_0 = E_n / I_n$ — базовое сопротивление.

На структурной схеме представлены два одинаковых контура регулирования токов вентиляльных секций, регулятор скорости, звено $1/T_{jp}$, характеризующее механическую инерцию привода, учтена внутренняя обратная связь по ЭДС двигателя. В отличие от традиционной двухконтурной САР скорости для рассматриваемой схемы характерны перекрестные связи через звенья $R_{\alpha}(1 + E_{\alpha}p)$, которые оказывают влияние на качество регулирования токов вентиляльных секций и в целом на качество регулирования скорости электропривода.

Для анализа влияния перекрестных связей на качество регулирования тока и скорости выполнено моделирование рассматриваемой САР скорости с двумя регуляторами тока в среде MATLAB-Simulink [5]. В процессе моделирования использовались параметры главного электропривода прошивного стана трубопрокатного агрегата, которые характерны для мощных электроприводов и других прокатных станов. В состав электропривода входят: двигатель постоянного тока с параметрами: $U_n = 750$ В, $I_n = 1500$ А, сопротивление якоря $R_{\alpha} = 0,039$ Ом, индуктивность якоря $L_{\alpha} = 4,627$ мГн; уравнивательные реакторы с параметрами: сопротивление реактора $R_p = 0,002$ Ом, индуктивность реактора $L_p = 1,877$ мГн; трехобмоточный трансформатор ТРЗСП — 4000/6 УХЛЗ с параметрами: номинальная мощность $S_n = 4000$ кВА, номинальное напряжение первичной обмотки $U_{n1} = 6$ кВ, номинальное напряжение вторичных обмоток $U_{n2} = 667$ В, напряжение корот-

кого замыкания $U_k = 4$ %, потери короткого замыкания $P_k = 17,5$ кВт, приведенное ко вторичной обмотке активное сопротивление фазы трансформатора $R_T = 0,001$ Ом, приведенное ко вторичной обмотке индуктивное сопротивление фазы трансформатора $X_T = 0,009$ Ом, индуктивность фазы трансформатора $L_T = 0,28$ мГн, фиктивное сопротивление вентиляльной секции, обусловленное коммутацией вентиляей $R_x = 0,0085$ Ом.

В процессе моделирования принята настройка контуров регулирования тока вентиляльных секций по «техническому оптимуму» с некомпенсируемой малой постоянной времени, определяющей полосу пропускания контуров тока, $T_{\mu} = 0,005$ с. Такая величина T_{μ} обеспечивает надежную работу тиристорного преобразователя и позволяет при анализе не учитывать дискретные свойства преобразователя. Принята линейная модель вентиляльной секции с передаточной функцией [3,6]:

$$W_{ТП} = \frac{K_{ТП}}{1 + T_{\mu} p} \quad (6)$$

С учетом вышеизложенного передаточная функция регуляторов тока при моделировании принята:

$$W_{РТ} = \frac{R_{\alpha} \cdot (1 + T_{\alpha} p)}{K_{ТП} \cdot 2T_{\mu} p} \quad (7)$$

На рисунке 4 приведена осциллограмма переходного процесса в токе при ступенчатом изменении задания тока при отдельной работе вентиляльных секций без учета влияния перекрестных связей (автономная работа вентиляльной секции). Такая работа характерна для

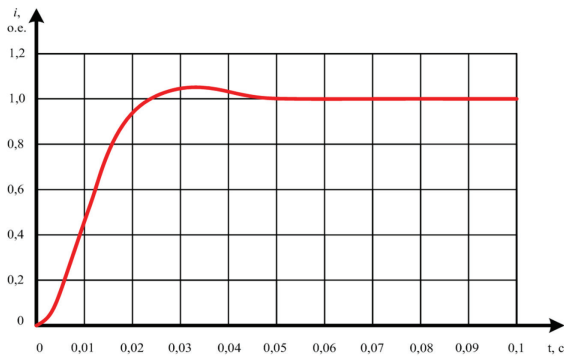


Рис. 4. Осциллограмма переходного процесса в токе при раздельной работе вентильных секций без учета влияния перекрестных связей

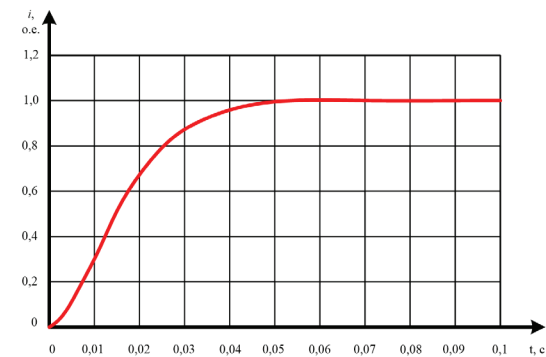


Рис. 5. Осциллограмма переходного процесса в токе при совместной работе вентильных секций с учетом влияния перекрестных связей

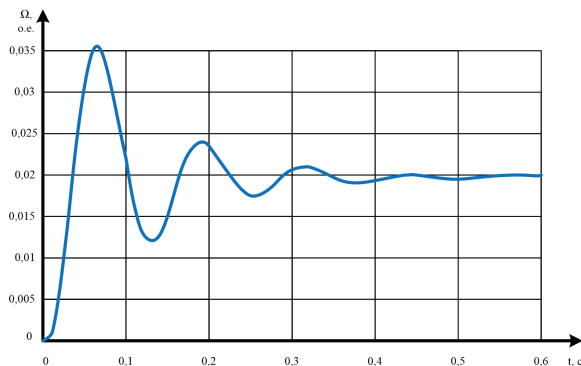


Рис. 6. Осциллограмма переходного процесса по скорости без учета влияния перекрестных связей

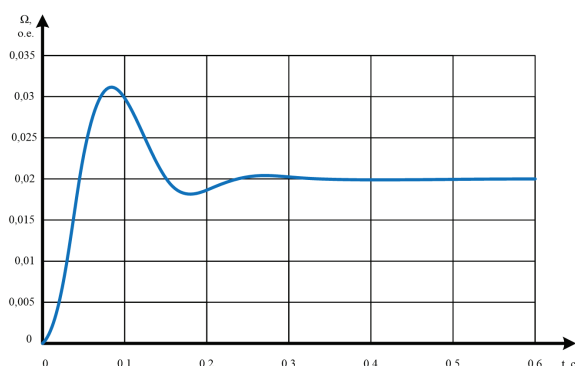


Рис. 7. Осциллограмма переходного процесса по скорости при снижении частоты среза

режима наладки контуров регулирования тока вентильных секций.

Как следует из осциллограммы, частота среза контуров тока составляет $\omega_c = 100$ рад/с.

При совместной работе вентильных секций за счет влияния перекрестных связей быстродействие контуров регулирования тока снижается в 2–3 раза, что иллюстрируется осциллограммой на рисунке 5.

Указанное снижение быстродействия контуров регулирования тока приводит к необходимости снижения быстродействия САР скорости, настроенной в соответствии с общеизвестным «симметричным оптимумом» и регулятором скорости с передаточной функцией, соответствующей этому оптимуму:

$$W_{PC} = \frac{T_j}{4T_\mu} \cdot \frac{1+8T_\mu p}{8T_\mu p} \quad (8)$$

Не учет влияния перекрестных связей приводит к значительному снижению запасов устойчивости САР скорости и повышенной колебательности в скорости (см. рис. 6).

Для сохранения запасов устойчивости САР скорости и получения процессов близких к «симметричному оптимуму» необходимо снизить частоту среза САР скорости в 1,5–2 раза с $\omega_c = 50$ рад/с до $\omega_c = (30-20)$ рад/с. На рисунке 7 приведена осциллограмма переходного процесса в скорости (ступенчатое изменение задания скорости) при снижении частоты среза САР в 1,5 раза, $\omega_c = 30$ рад/с. В этом случае передаточная функция регулятора скорости характеризуется выражением [6]:

$$W_{PC} = \frac{T_j}{6T_\mu} \cdot \frac{1+12T_\mu p}{12T_\mu p} \quad (9)$$

Как видно из осциллограммы, переходный процесс близок к «симметричному оптимуму», хотя немного повышена колебательность.

Таким образом, перекрестные связи контуров регулирования токов вентильных секций приводят к снижению быстродействия САР скорости, что может быть крайне нежелательно для электроприводов мощных станов холодной прокатки, трубных станов.

Список литературы

1. Ключев В. И. Теория электропривода. 3-е изд., перераб. М.: Энергоатомиздат, 2001. 704 с.
2. Зимин Е. Н., Кацевич В. Л., Козырев С. К. Электроприводы постоянного тока с вентильными преобразователями. М.: Энергоиздат, 1981. 192 с.
3. Терехов В. М., Осипов О. И. Системы управления электроприводов. М.: Академия, 2005. 304 с.
4. Плотников Ю. В., Поляков В. Н. Системы управления электроприводами постоянного тока (преобразователь Sinamics DCM): учебно-методическое пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2017. 96 с.
5. Терехин В. Б. Моделирование систем электропривода в Simulink. Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2008. 320 с.
6. Шрейнер Р. Т. Системы подчиненного регулирования электроприводов. Екатеринбург: Рос. гос. проф. пед. ун-т, 2008. 279 с.

List of literature

1. Klyuchev V. I. Theory of electric drive. Moscow: Energoatomizdat, 1998. 704 p.
2. Zimin E. N., Katsevich V. L., Kozyrev S. K. DC electric drives with valve converters. Moscow: Energoizdat, 1981. 192 p.
3. Terekhov V. M., Osipov O. I. Control systems of electric drives. Moscow: Academy, 2005. 304 p.
4. Plotnikov Yu. V., Polyakov V. N. Control systems for DC electric drives (Sinamics DCM converter): educational and methodological manual. Yekaterinburg: Ural Publishing House. un-t, 2017. 96 p.
5. Terekhin V. B. Modeling of electric drive systems in Simulink. Tomsk: Publishing House of Tomsk Polytechnic University, 2008. 320 p.
6. Schreiner R. T. Systems of subordinate regulation of electric drives: a textbook. Yekaterinburg: Publishing house of Russian State Prof. ped. un-t, 2008. 279 p..