

УДК 621.313.1:629.458.27

ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ИНВАРИАНТНЫХ СТЕНДОВ С РЕКУПЕРАЦИЕЙ ЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

В. С. ЗАХАРЕНКО, И. В. ДОРОЩЕНКО

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Введение

Существует множество путей повышения качества и надежности новой выпускаемой техники. Одним из путей повышения надежности является проведение многочисленных стендовых испытаний важных узлов машин, следовательно, немаловажным является развитие и совершенствование методов стендовых испытаний.

В данной работе рассматривается область применения испытательных стендов, обеспечивающих постоянство частоты вращения и момента нагрузки. Эти испытательные стенды построены на основе электрических машин постоянного тока и способны возвращать часть энергии в сеть или в привод.

Научная идея построения высокоуправляемых испытательных стендов заключается в использовании каскада взаимонагруженных машин постоянного тока с системой управления приводной частью, поддерживающей постоянство частоты вращения и с системой управления нагрузочной частью, поддерживающей постоянство момента нагрузки при отдаче энергии в сеть.

Цель работы

Целью данной работы является рассмотрение области применения инвариантных стендов с рекуперацией энергии на основе электрических машин постоянного тока, в частности, определение области допустимых значений потока возбуждения, тока якоря генератора, а также момента двигателя.

Общие положения

Как известно, в большинстве современных приводов транспортных средств, строительных механизмов, обрабатывающих устройств и других рабочих машин используются механические трансмиссии, передающие вращательное движение двигателя рабочим органам. Надежность и качество работы таких приводов напрямую зависят от прочности трансмиссий и надежности работы трансмиссий в широком диапазоне нагрузочных моментов и угловых скоростей.

Отсюда становится понятным возросший интерес к разработке новых методов и средств испытания рабочих машин и их трансмиссий у изготовителей, а особенно у разработчиков новой техники.

ГОСТами 16504-81, 16162-93, 29285-95 определено около 45 видов испытаний, которым подвергаются механические трансмиссии. Важнейшими из них являются стендовые испытания, когда программа испытаний реализуется при моделировании механических воздействий, соответствующих реальным условиям использования трансмиссий. Наиболее эффективно создаются различные нагрузочные механические характеристики с помощью управляемых электромеханических стендов.

Для испытаний трансмиссий новой техники и особенно исследования их поведения в условиях, приближенных к реальным рабочим или аварийным, требуется исследовательский стенд, который может обеспечивать механические нагрузки в широком диапазоне с высокой точностью и быстродействием. Причем переход от одного вида нагрузочных характеристик к другим должен осуществляться программной системой автоматического управления. В настоящее время высокие требования предъявляются к управляемости (из-за необходимости автоматизации), энерго- и ресурсосбережению.

Трудно не согласиться с тем, что в дальнейшем будут возрастать требования к испытательным стендам по энергосбережению. Наибольшее энергосбережение обеспечивают стенды, построенные на принципе взаимной нагрузки электрических машин [1]. Это делает наиболее перспективным для испытания трансмиссий, электрических машин и приводов применение машин постоянного тока, поскольку они обеспечивают наилучшую гибкость регулирования, наилучшие динамические свойства электропривода и наибольший диапазон регулирования [1].

На рис. 1, 2 и 3 представлены функциональные схемы стендов с рекуперацией энергии в сеть и в привод [1], [2], [3].

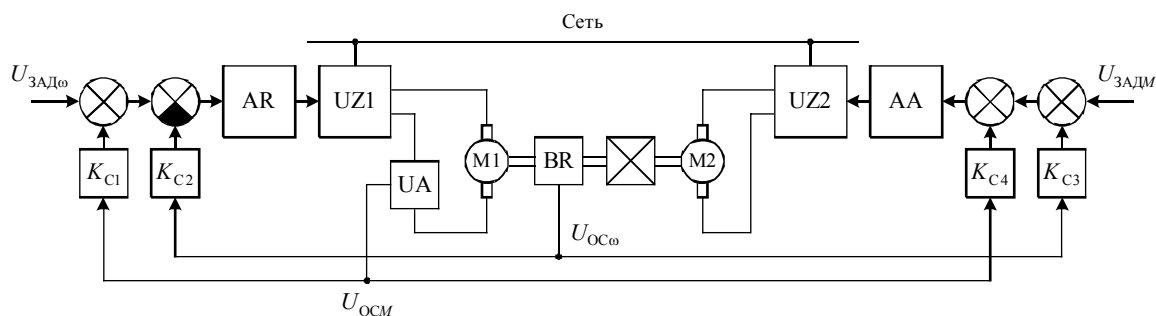


Рис. 1. Функциональная схема стенда с рекуперацией энергии в сеть и управлением нагрузочной машиной по якорному каналу

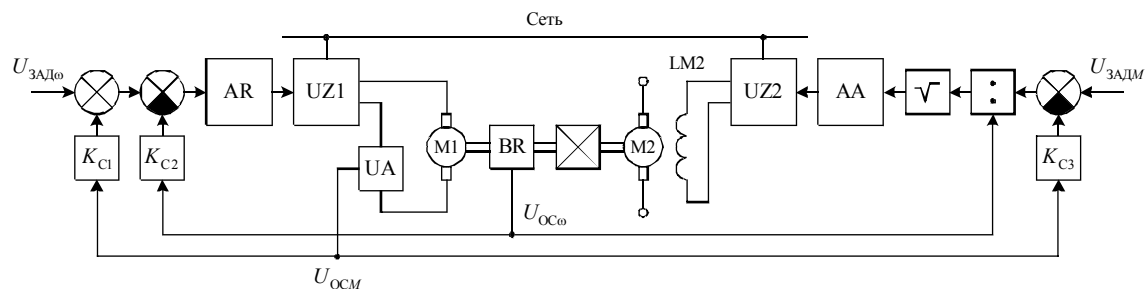


Рис. 2. Функциональная схема стенда с рекуперацией энергии в сеть и управлением нагрузочной машиной по каналу возбуждения

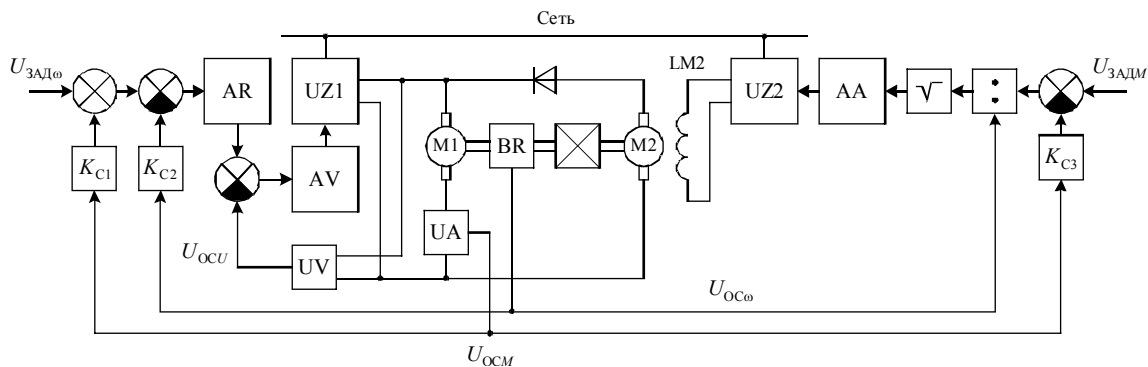


Рис. 3. Функциональная схема стенда с рекуперацией энергии в привод

На схемах обозначено: M1 – двигатель; M2 – генератор; UZ1, UZ2 – преобразователи; UA – датчик тока якоря двигателя; BR – датчик скорости вращения; AR – регулятор скорости с относительным коэффициентом передачи K_{PCO} ; AA – регулятор тока с относительным коэффициентом передачи K_{PMO} ; AV – регулятор якорного напряжения; UV – датчик напряжения; $K_{C1}, K_{C2}, K_{C3}, K_{C4}$ – коэффициенты передачи суммирующих усилителей по каналам обратных связей.

Регулятор тока AA выполняет функцию регулятора момента, т. к. электродвигатель работает при постоянном номинальном потоке.

Первый вариант стенда (рис. 1) обеспечивает регулирование момента и скорости от нулевых до номинальных значений, а также выше номинального значения скорости при условии ограничения мощности (не выше номинального значения).

Определим области допустимых значений момента двигателя, потока возбуждения и тока якоря генератора для стенда, схема которого указана на рис. 2.

Используя системы уравнений (2.7) и (2.8) [1]

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{я01} = K_{E1} \cdot E_{я01} + R_{я01} \cdot I_{я01}, \\ M_{O1} = k\Phi_{O1} \cdot I_{я01}, \\ E_{я01} = k\Phi_{O1} \cdot \omega_{O1}, \\ U_{BO2} = I_{BO2}, \\ U_{я02} = K_{E2} \cdot E_{я02} - R_{O2} \cdot I_{я02}, \\ M_{O2} = k\Phi_{O2} \cdot I_{я02}, \\ E_{я02} = k\Phi_{O2} \cdot \omega_{O2}, \\ k\Phi_{O2} = I_{BO2}, \\ M_{O1} = \frac{1}{i \cdot K_M} \cdot M_{O2}, \\ \omega_{O2} = \frac{1}{i \cdot K_\omega} \cdot \omega_{O1}, \\ U_{OCMO} = M_{O1}, \\ U_{OC\omega O} = \omega_{O1}. \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_{O1} = \frac{k\Phi_{O1} \cdot U_{я01} - R_{я01} \cdot M_{O1}}{K_{E1} \cdot k\Phi_{O1}^2}, \\ M_{O1} = \frac{K_{E2} \cdot U_{BO2}^2 \cdot \omega_{O1} - i \cdot K_\omega \cdot U_{я02} \cdot U_{BO2}}{i^2 \cdot K_M \cdot K_\omega \cdot R_{я02}}, \\ U_{OCMO} = M_{O1}, \\ U_{OC\omega C} = \omega_{O1}. \end{array} \right. \quad (2)$$

где $U_{я01}, U_{я02}$ – напряжения на якорях двигателя и генератора, в относительных единицах; K_{E1}, K_{E2} – отношения номинальных ЭДС и напряжения якоря двигателя и генератора; $E_{я01}, E_{я02}$ – ЭДС якоря двигателя и генератора, в относительных величинах; K_M – отношение номинального момента двигателя к номинальному моменту генератора; K_ω – отношение номинальной частоты вращения генератора к номинальной частоте вращения двигателя; $R_{я01}, R_{я02}$ – относительные сопротивле-

ния якорных цепей двигателя и генератора; $I_{я01}$, $I_{я02}$ – значения токов якоря двигателя и генератора в относительных величинах; $k\Phi_{01}$, $k\Phi_{02}$ – произведения конструктивных коэффициентов машин на поток возбуждения двигателя и генератора, в относительных единицах; M_{01} , M_{02} – значения моментов двигателя и генератора, в относительных величинах; ω_{01} , ω_{02} – значения частот вращения двигателя и генератора, в относительных величинах; $U_{в02}$ – напряжение возбуждения генератора, в относительных единицах; $I_{в02}$ – значение тока возбуждения генератора, в относительных величинах; i – передаточное число трансмиссии; $U_{ос\omega 0}$ – напряжение обратной связи по моменту, в относительных единицах; $U_{ос\omega 0}$ – напряжение обратной связи по скорости, в относительных единицах.

Получим уравнения для построения кривых, ограничивающих область допустимых значений потока возбуждения ($k\Phi_{02д}$) и тока якоря ($I_{я02д}$) генератора:

$$\begin{cases} M_{01} = k\Phi_{02д} \cdot \frac{K_{E2} \cdot k\Phi_{02д} \cdot \omega_{01н} - i \cdot K_{\omega} \cdot U_{я02н}}{i^2 \cdot K_M \cdot K_{\omega} \cdot R_{я02}}, \\ M_{01} = K_{\omega} \cdot I_{я02д} \cdot \frac{U_{я02н} + R_{я02} \cdot I_{я02д}}{K_{E2} \cdot K_M \cdot \omega_{01}}, \end{cases} \quad (3)$$

где $k\Phi_{02д}$ – произведение конструктивного коэффициента машины на поток возбуждения генератора (допустимое значение), в относительных единицах; $U_{я02н}$ – номинальное напряжение на обмотке якоря генератора, в относительных величинах; $\omega_{01н}$ – номинальное значение частоты вращения двигателя, в относительных величинах; $I_{я02д}$ – допустимое значение тока якоря генератора, в относительных величинах; $I_{02д}$ – допустимое значение тока генератора, в относительных величинах.

Механические характеристики стенда приведены на рис. 4. Кривые 1, 2 и 3 соответствуют приводной части стенда; 4, 5 и 6 – нагрузочной. Кривые 1, 4 – при номинальном сигнале задания; 2, 5 – при половине номинального; 3, 6 – при нулевом значении сигнала задания. Характеристики нагрузочной части с учетом САУ построены при различных значениях $K_{рМО}$ (коэффициента передачи регулятора момента): сплошные линии – $K_{рМО} = 5$; штриховые – $K_{рМО} = 10$; пунктирные – $K_{рМО} = 20$. Напряжение на якоре генератора $U_{я02н} = 0,3$. На рис. 5 построены по (1) границы областей допустимых значений $k\Phi_{02д} < 1$ (кривые 1...4) и $I_{я02д} < 1$ (кривые 5...8). Кривые 1, 5 – при $U_{я02н} = 1$; 2, 5 – при $U_{я02н} = 0,7$; 3, 7 – при $U_{я02н} = 0,5$; 4, 8 – при $U_{я02н} = 0,3$. Штриховкой показаны области допустимых значений при $U_{я02н} = 0,5$.

Найдем области допустимых значений для стенда, функциональная схема которого показана на рис. 3.

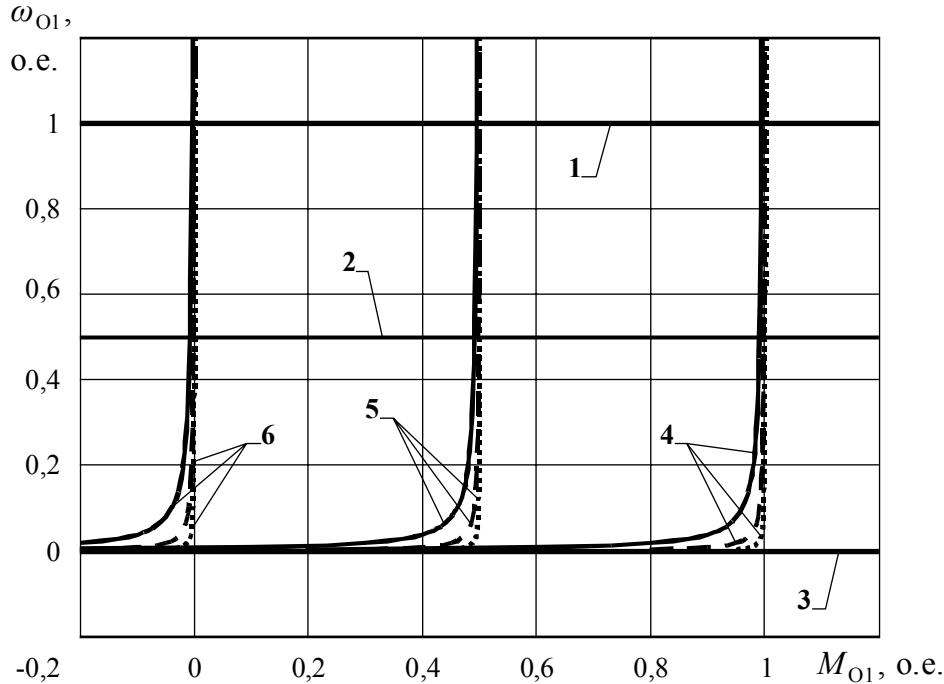


Рис. 4. Механические характеристики стенда с рекуперацией энергии в сеть и управлением генератором по каналу возбуждения

Используя системы уравнений (1) и (2), получим выражения для границ областей допустимых значений потока возбуждения, тока якоря генератора, а также момента двигателя из-за снижения потока возбуждения:

$$\left\{ \begin{array}{l} M_{O1} = k\Phi_{O1H}, \\ M_{O1} = k\Phi_{O1H} \cdot k\Phi_{O2D} \cdot \omega_{O1} \cdot \frac{K_{E2} \cdot k\Phi_{O2D} - i \cdot K_{\omega} \cdot K_{E1} \cdot k\Phi_{O1H}}{i \cdot K_{\omega} \cdot (i \cdot K_M \cdot R_{яO2D} \cdot k\Phi_{O1H} + R_{яO1D} \cdot k\Phi_{O2D})}, \\ M_{O1} = i \cdot K_{\omega} \cdot k\Phi_{O1H} \cdot I_{яO2D} \cdot \frac{K_{E1} \cdot k\Phi_{O1H} \cdot \omega_{O1} + R_{яO2D} \cdot I_{яO2D}}{K_{E2} \cdot k\Phi_{O1H} \cdot \omega_{O1} - R_{яO1D}}. \end{array} \right. \quad (4)$$

где $k\Phi_{O1H}$ – произведение конструктивного коэффициента машины на поток возбуждения двигателя (номинальное значение), в относительных единицах; $R_{яO2D}$ – относительное сопротивление обмотки якоря генератора без учета параметров преобразователя; $R_{яO1D}$ – относительное сопротивление обмотки якоря двигателя без учета параметров преобразователя.

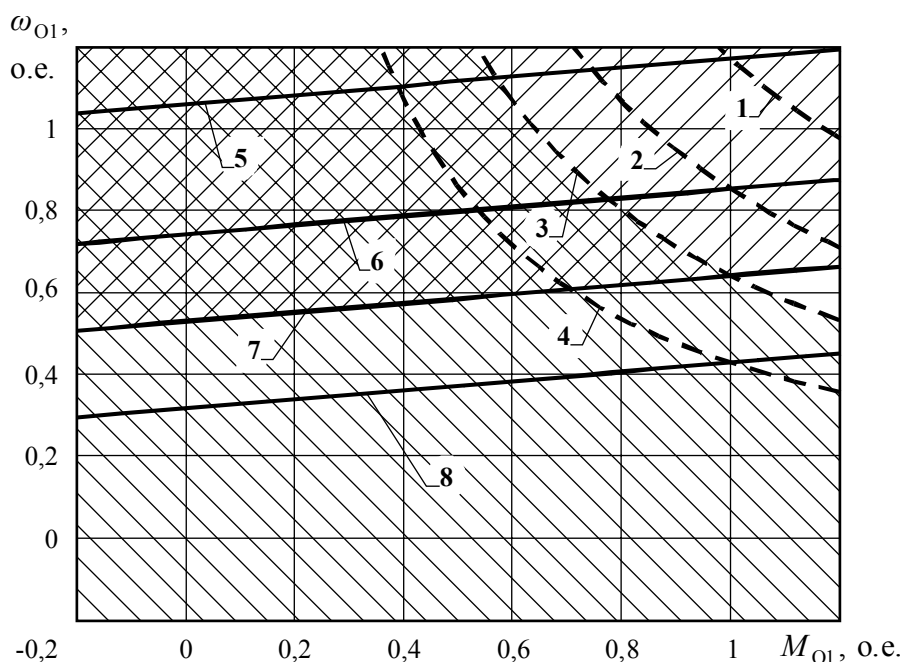


Рис. 5. Области допустимых значений потока возбуждения и тока якоря генератора для стенда с рекуперацией энергии в сеть и управлением генератором по каналу возбуждения

Найдем области допустимых значений для стенда, функциональная схема которого показана на рис. 3.

Используя системы уравнений (1) и (2), получим выражения для границ областей допустимых значений потока возбуждения, тока якоря генератора, а также момента двигателя из-за снижения потока возбуждения:

$$\left\{ \begin{array}{l} M_{O1} = k\Phi_{O1H}, \\ M_{O1} = k\Phi_{O1H} \cdot k\Phi_{O2D} \cdot \omega_{O1} \cdot \frac{K_{E2} \cdot k\Phi_{O2D} - i \cdot K_{\omega} \cdot K_{E1} \cdot k\Phi_{O1H}}{i \cdot K_{\omega} \cdot (i \cdot K_M \cdot R_{яO2} \cdot k\Phi_{O1H} + R_{яO1} \cdot k\Phi_{O2D})}, \\ M_{O1} = i \cdot K_{\omega} \cdot k\Phi_{O1H} \cdot I_{яO2D} \cdot \frac{K_{E1} \cdot k\Phi_{O1H} \cdot \omega_{O1} + R_{яO2} \cdot I_{яO2D}}{K_{E2} \cdot k\Phi_{O1H} \cdot \omega_{O1} - R_{яO1}}. \end{array} \right. \quad (5)$$

где $k\Phi_{O1H}$ – произведение конструктивного коэффициента машины на поток возбуждения двигателя (номинальное значение), в относительных единицах; $R_{яO2}$ – относительное сопротивление обмотки якоря генератора без учета параметров преобразователя; $R_{яO1}$ – относительное сопротивление обмотки якоря двигателя без учета параметров преобразователя.

На рис. 6 приведены механические характеристики стенда. Кривые 1, 2 и 3 соответствуют приводной части стенда; 4, 5 и 6 – нагрузочной. Кривые 1, 4 – при номинальном сигнале задания; 2, 5 – при половине номинального; 3, 6 – при нулевом значении сигнала задания. Искусственные характеристики для нагрузочной части построены при различных значениях K_{PMO} : сплошные линии – $K_{PMO} = 5$; штриховые – $K_{PMO} = 10$; пунктирные – $K_{PMO} = 20$. На рис. 7 построены по выражениям (2) границы областей допустимых значений момента двигателя (кривые 9...12), потока возбужде-

ния генератора $k\Phi_{02д} < 1$ (кривые 5..8) и тока якоря генератора $I_{я02д} < 1$ (кривые 1..4). Кривые 1, 5 и 9 – при $k\Phi_{01н} = 1$; 2, 6 и 10 – при $k\Phi_{01н} = 0,7$; 3, 7 и 11 – при $k\Phi_{01н} = 0,5$; 4, 8, 12 при $k\Phi_{01н} = 0,3$. Штриховкой выделены области допустимых значений момента двигателя и потока возбуждения генератора, серым цветом – области допустимых значений тока якоря генератора. Выделенные области построены при $k\Phi_{01н} = 0,5$.

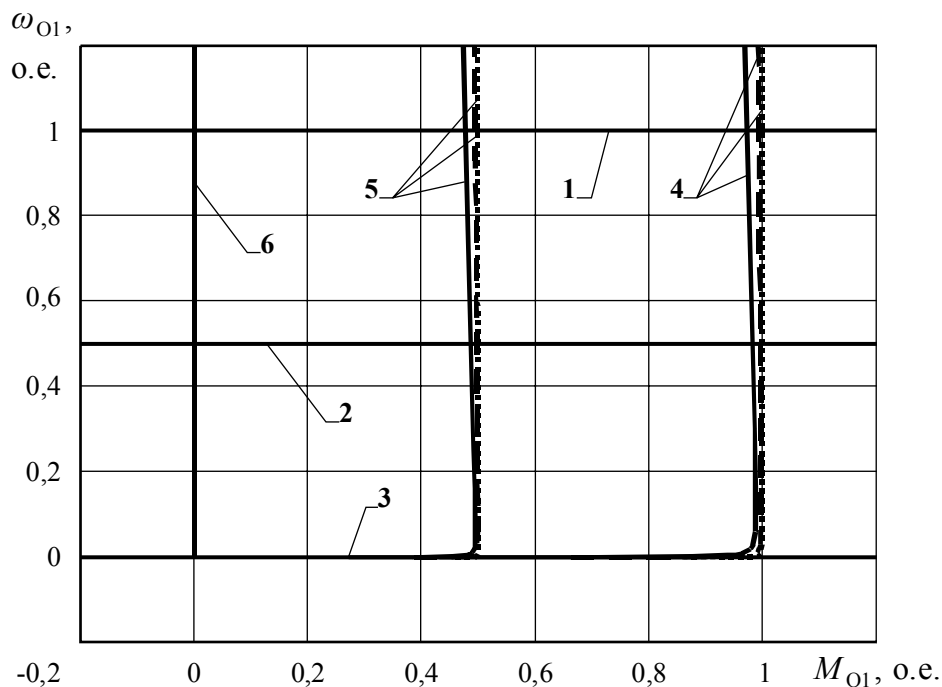


Рис. 6. Механические характеристики стенда с рекуперацией энергии в привод

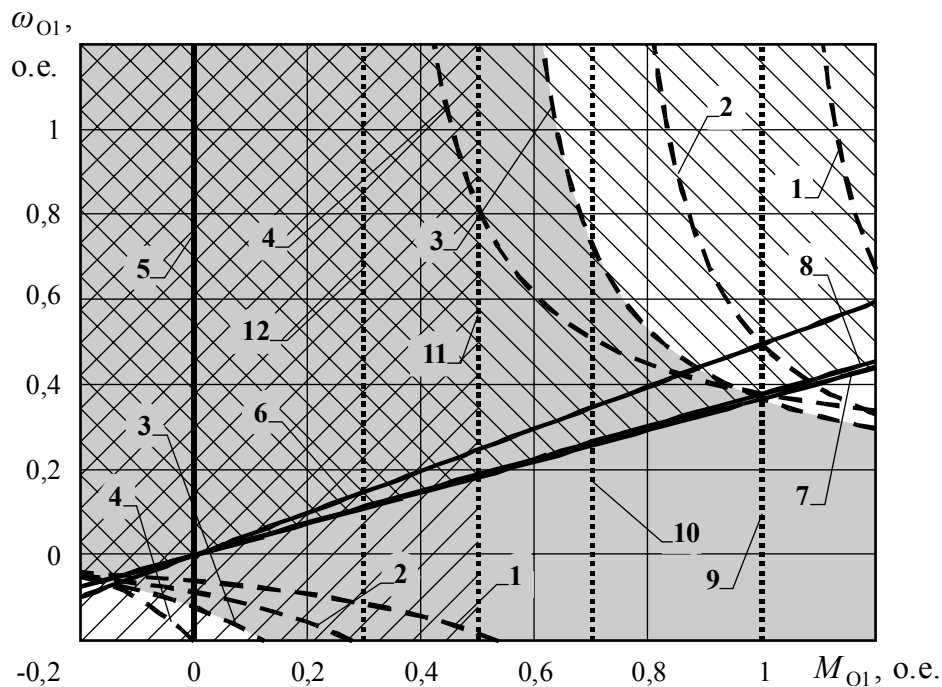


Рис. 7. Область допустимых значений момента двигателя, потока возбуждения и тока якоря генератора для стенда с рекуперацией энергии в привод

Обсуждение полученных результатов, выводы

Из приведенного анализа видно, что наибольшую область допустимых значений имеет стенд с рекуперацией энергии в сеть и управлением генератора по якорному каналу. Стенд с рекуперацией энергии в привод имеет меньшую область допустимых значений момента и скорости, но он обеспечивает более высокие энергетические показатели за счет отсутствия потерь в преобразователе, согласующем генератор с сетью.

Литература

1. Захаренко, В. С. Инвариантный электромеханический стенд с рекуперацией энергии для испытания механических трансмиссий: дис. ... к-та техн. наук: 05.09.03. – Гомель, 2000. – 123 с.
2. Пат. 5370 ВУ, МПК7 Н02Р 5/00, Н04R 29/00. Устройство для управления системой нагружения испытательного стенда / В. И. Луковников, С. И. Захаренко, В. А. Савельев. – № 19990246; заявл. 17.03.99; опубл. 30.09.2003 //Афіцыйны бюлетэнь /Дзярж. пат. ведамства Рэсп. Беларусь. – 2003. – № 3. – С. 50.
3. Пат. 5694 ВУ, МПК7 Н02Р 5/00, Н04R 29/00. Устройство для управления системой нагружения испытательного стенда / В. И. Луковников, С. И. Захаренко, В. А. Савельев. – № 19990325; заявл. 06.04.99; опубл. 30.12.2003 //Афіцыйны бюлетэнь /Дзярж. пат. ведамства Рэсп. Беларусь. – 2003. – № 4.

Получено 12.06.2006 г.