

СИСТЕМА ЭКСТРЕМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ВЗАИМНЫМ НАГРУЖЕНИЕМ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Ломонос А. И.

*Кременчугский государственный политехнический университет имени Михаила Остроградского
saue05e@polytech.poltava.ua*

In the given paper substantiation study of structure and principles of the control system of the pump back direct current machine construction with electromechanics compensate has been drawn. Work of the control system at the correlation change of the observable engine and compensate powers is analyzed.

Введение. В процессе эксплуатации электрические машины выходят из строя по различным причинам: некачественное обслуживание, пробой изоляции, износ подшипникового узла и т.д. При ремонте происходит замена или модернизация поврежденной части машины, вследствие чего параметры отремонтированной машины (электрические и энергетические) могут не соответствовать параметрам и характеристикам машины до ремонта [1]. Использование такой машины в прежнем технологическом процессе может привести к быстрому повторному выходу ее из строя. Поэтому целесообразным является определение нового паспорта электрической машины, прошедшей ремонт. Это можно выполнить в ходе послеремонтных испытаний.

В электроремонтных цехах испытания обычно проводятся при статическом нагружении, когда управляющие воздействия неизменны во времени или меняются медленно. Под нагрузкой машины испытывают с целью определения механических свойств, устойчивости их к механическим и токовым нагрузкам, а также для определения параметров машины и соответствия их нормам. Системам статического нагружения присущи существенные недостатки: (несоответствие реальным эксплуатационным режимам, процесс подготовки к испытаниям трудоёмок и долговременен в связи с закреплением двигателя на фундаментной плите и механическим агрегированием).

Использование систем динамического нагружения для испытания отремонтированных электрических машин позволяет отказаться от дополнительной нагрузочной машины и необходимости её установки и наладки; при этом значительно выше получаемый информативный материал [1]. Однако формирование знакопеременного электромагнитного момента для обеспечения необходимой токовой нагрузки требует установки силового трансформаторного и преобразовательного оборудования завышенной мощности [1, 2].

Таким образом, для снижения влияния системы на питающую сеть и уменьшения установленной мощности оборудования испытательного комплекса необходимо применение устройств управления режимами нагружения, которые бы позволяли обеспечить как формирование режима нагружения, так и снижения влияния на энергоснабжающую сеть [3,4].

Анализ предыдущих исследований. В процессе нагружения в силовых цепях циркулирует знакопеременная мощность, вызывая дополнительные потери. Следовательно, сущность управления энергетическими режимами заключается в том, что необходимо создать условия для исключения из силовых цепей питающих трансформаторов и преобразователей знакопеременных составляющих мощности. В этом случае из сети будет потребляться только мощность, идущая на потери в испытываемой машине и в используемом оборудовании комплекса.

Для решения этого вопроса необходимо применение накопительно-компенсирующих устройств, создающих дополнительный силовой канал для циркуляции знакопеременной мощности в цепях, не связанных с преобразовательными устройствами и системами.

При этом важным направлением исследования является определение способов управления таким оборудованием.

В работе [4] предложен способ использования электромеханического накопителя-компенсатора, в качестве которого применяется машина постоянного тока; приведен общий подход к осуществлению нагружения испытываемой машины и компенсации циркулирующей в системе знакопеременной мощности.

Принципы построения регулятора нагрузки системы испытания и алгоритмы определения и формирования управляющих воздействий, при которых будет достигаться наибольший эффект компенсации переменной мощности и минимальное потребление энергии из сети, сформулированы в работе [5].

Анализ режимов нагружения и компенсации при математическом моделировании и экспериментальном исследовании в разомкнутой системе приведены в работе [6].

Цель работы – обоснование структуры и принципов построения системы управления взаимным нагружением машины постоянного тока с электромеханическим компенсатором.

Материал и результаты исследования. В соответствии с приведенной в [3] классификацией накопительно-компенсирующих устройств, наибольший эффект дает применение компенсаторов в цепи постоянного тока, тем самым возможно снижение установленной мощности используемого оборудования и уменьшение влияния на энергоснабжающую сеть.

Функциональная схема нагрузочного устройства с компенсатором в якорной цепи представлена на рис. 1. На основании функциональной схемы (рис. 1) составим схему замещения системы нагружения с электромеханическим компенсатором (рис. 2).

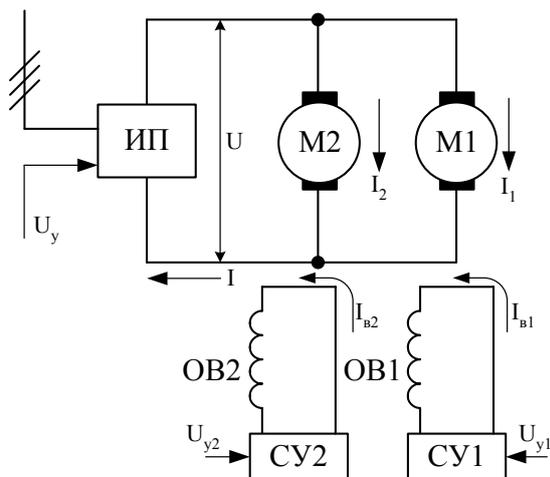


Рисунок 1 – Функциональная схема системы нагружения с компенсатором

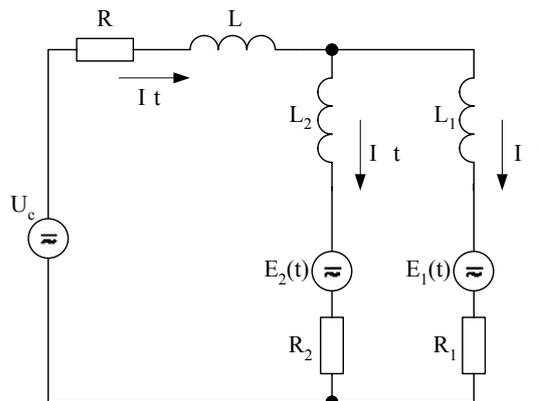


Рисунок 2 – Схема замещения системы нагружения с компенсатором

Система уравнений, описывающих процессы в схеме, имеет вид:

$$\begin{aligned}
 U(t) &= I(t) \cdot R + L \cdot \frac{dI(t)}{dt} + I_{я1}(t) \cdot R_{я1} + L_{я1} \cdot \frac{dI_{я1}(t)}{dt} + k\Phi_1(t) \cdot \omega_1(t); \\
 U(t) &= I(t) \cdot R + L \cdot \frac{dI(t)}{dt} + I_{я2}(t) \cdot R_{я2} + L_{я2} \cdot \frac{dI_{я2}(t)}{dt} + k\Phi_2(t) \cdot \omega_2(t); \\
 I(t) &= I_{я1}(t) + I_{я2}(t); \\
 E_1(t) &= k\Phi_1(t) \cdot \omega_1(t); \quad E_2(t) = k\Phi_2(t) \cdot \omega_2(t); \\
 k\Phi_1 &= c_1(I_{\epsilon 1}); \quad k\Phi_2 = c_2(I_{\epsilon 2}); \\
 U_{\epsilon 1}(t) &= I_{\epsilon 1}(t) \cdot R_{\epsilon 1} + \frac{d}{dt} \{L_{\epsilon 1}(I_{\epsilon 1}) \cdot I_{\epsilon 1}\}; \quad U_{\epsilon 2}(t) = I_{\epsilon 2}(t) \cdot R_{\epsilon 2} + \frac{d}{dt} \{L_{\epsilon 2}(I_{\epsilon 2}) \cdot I_{\epsilon 2}\}; \\
 I_{я1}(t) \cdot k\Phi_1(t) &= M_{01}(t) + J_1 \cdot \frac{d\omega_1(t)}{dt}; \quad I_{я2}(t) \cdot k\Phi_2(t) = M_{02}(t) + J_2 \cdot \frac{d\omega_2(t)}{dt},
 \end{aligned} \tag{1}$$

где E , R и L – Э.Д.С., активное сопротивление и индуктивность источника питания соответственно; $R_{я1}$ и $X_{я1}$ – активное и индуктивное сопротивления испытуемой машины; $R_{я2}$ и $X_{я2}$ – активное и индуктивное сопротивления накопителя-компенсатора; $k\Phi_1(t)$, $k\Phi_2(t)$ – коэффициенты магнитного потока испытуемой машины и компенсатора; $U_{\epsilon 1}(t)$, $U_{\epsilon 2}(t)$, $I_{\epsilon 1}(t)$, $I_{\epsilon 2}(t)$ – напряжения и токи в цепях возбуждения электрических машин; $R_{\epsilon 1}$, $R_{\epsilon 2}$, $L_{\epsilon 1}$, $L_{\epsilon 2}$ – активные сопротивления и индуктивности в цепях возбуждения электрических машин; c_1 , c_2 – конструктивные коэффициенты машин; $\omega_1(t)$, $\omega_2(t)$ – частоты вращения двигателя и накопителя; J_1 , J_2 – моменты инерции двигателя и накопителя; $M_{01}(t)$, $M_{02}(t)$ – моменты механического сопротивления вращению, обусловленные потерями в стали, в подшипниковых узлах и щеточно-коллекторном аппарате. С целью упрощения исследования принимаем [5]: $M_{01}(t) = a_1 \cdot \omega_1(t)$, $M_{02}(t) = a_2 \cdot \omega_2(t)$, где a_1 , a_2 – коэффициенты моментов механического сопротивления вращению.

Управление возбуждающими устройствами машин постоянного тока в схеме (рис. 1) должно осуществляться таким образом, чтобы переменные составляющие токов были направлены навстречу друг другу в цепи якорей двух электрических машин:

$$I_1(t) = I_{01} + \sum_{m=1}^{\infty} I_{m1} \cdot \cos(\Omega \cdot m \cdot t + \psi_1); \quad I_2(t) = I_{02} + \sum_{m=1}^{\infty} I_{m2} \cdot \cos(\Omega \cdot m \cdot t + \psi_2), \tag{2}$$

где $I_{0\delta}$, $I_{0\kappa}$, $I_{m\delta}$, $I_{m\kappa}$ – амплитуды постоянных и переменных составляющих токов якоря двигателя и компенсатора; φ_{δ} , φ_{κ} – углы сдвига переменных составляющих токов, Ω – частота нагружения.

Ток источника питания $I(t) = I_1(t) + I_2(t)$. В случае равенства частот задающих воздействий имеется возможность компенсировать любую из гармоник, входящих в выражения для якорных токов. Для этого, исходя из (2), необходимо выполнить условия для компенсации m -той гармоники:

$$I_{m1} = I_{m2}; \psi_1 - \psi_2 = \pi.$$

Отсюда становится очевидным принцип построения систем автоматической компенсации переменной составляющей тока в цепи источника питания:

- частоты воздействий на возбудительных системах должны быть равны;
- амплитуды воздействий должны быть такими, чтобы эффективное значение тока якоря нагружаемой машины было равно номинальному;
- амплитуды превалирующих гармоник должны быть равны, а их фазы должны отвечать условию $\psi_1 - \psi_2 = \pi$.

Для обоснования выбора типа и структуры системы управления (СУ) рассмотрим их классификацию [7]:

- по признаку наличия ошибки (статические, астатические);
- по признаку работы во времени (непрерывные, дискретные);
- по роду тока (с электроприводами переменного и постоянного тока);
- по принципу управления (разомкнутые, комбинированные, замкнутые).

Основными требованиями, предъявляемыми к СУ, являются формирование законов управления, которые позволят обеспечить минимальное и знакопостоянное значение тока источника питания при минимальном его действующем значении.

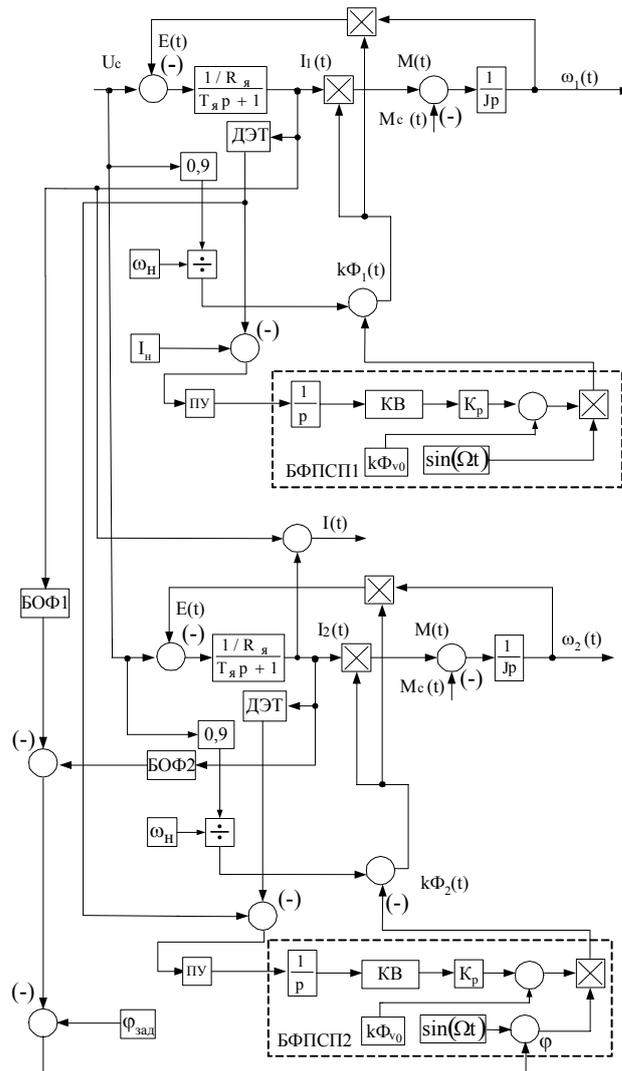


Рисунок 3 – Структурная схема СДН МПТ с автоматическим формированием режимов нагрузки и компенсации

Системы параллельной коррекции (система с общим сумматором, система с независимым регулированием) и системы подчиненного регулирования со стандартными настройками на модульный и симметричный оптимум стабилизирующие и применяются для случая линейных систем; в следящих системах выходным параметром является положение рабочего органа, которое меняется в зависимости от входного сигнала; адаптивные системы учитывают нелинейность системы, позволяют одновременно оптимизировать несколько параметров и нет необходимости знания полной информации об объекте управления, внешних возмущений и граничных условий.

В работе [8] предложена следующая классификация адаптивных систем:

- по способу функционирования (аналитические – оптимальное управление рассчитывается на основе анализа информации о состоянии объекта; поисковые – оптимальный режим определяется в результате поиска условия экстремума критерия эффективности; контролируемые – изменение состояния системы осуществляется за счет изменения управляющих воздействий, параметров настройки и структуры самой системы);
- в зависимости от объема изменения системы (экстремальные – изменяются только управляющее воздействие; самонастраивающиеся – изменяются управляющие воздействия и изменяются параметры системы; самоорганизующиеся – изменяются управляющие воздействия и параметры системы; самообучающиеся – изменяются алгоритмы работы и критерии эффективности);
- по способу осуществления контроля изменений системы (пассивные – изменения осуществляются по предварительно разработанной системе; активные – контролируемые переменные заранее не определены, а диктуются текущей ситуацией).

В режиме нагружения параметры, структура и алгоритм работы существенно изменяться не будут, поэтому выбирается поисковая экстремальная система, которая при неполной информации об объекте управления позволяет автоматически отыскивать и поддерживать на заданном (минимальном или максимальном) требуемый показатель качества.

Назначение экстремальной системы регулирования – находить оптимальные с точки зрения показателя качества значения регулирующих воздействий и поддерживать оптимальный режим при непрерывном изменении внешних возмущений, стремящихся изменить положение экстремума.

Следует отметить, что решить экстремальную задачу управления можно, используя, по крайней мере, один из двух основных принципов управления: либо принцип управления по возмущению, либо принцип управления с обратной связью по показателю качества. В последнее время большое внимание уделяется комбинированным системам, использующим оба эти принципа одновременно [8]. Анализ рассмотренных систем показал, что наибольший интерес представляет экстремальная система с запоминанием экстремума.

На основании приведенных положений построена структурная схема СДН МПТ с автоматическим формированием режима нагружения и автоматической компенсацией переменной составляющей тока источника питания, представленная на рис. 3.

В состав разработанной схемы входят блоки формирования переменной составляющей потока (БФПСП) двигателя и компенсатора, структура которых приведена на рис. 4. Блоки включают компаратор 5, сумматор 6, интегратор И, масштабирующие усилители У1-У3, квантователь КВ, задающий генератор ЗГ и умножитель УМ.

Работа предложенной системы заключается в следующем. С помощью сигналов напряжения управления устанавливаются значения напряжения якоря машины, постоянное значение потока обеих электрических машин, частота задающего генератора, значение которой выбирается из условия осуществления рационального нагружения [1].

Начальная амплитуда выходного потока задающего генератора с помощью масштабирующего усилителя устанавливается равной $0,001 \cdot k\Phi_{zn}$.

Двигатель разгоняется до установившейся заданной частоты вращения, после чего переключающие устройства ПУ включают БФПСП, причем блок БФПСП1 осуществляет формирование режима нагружения, а блок БФПСП2 формирует режим компенсации. Изменяется амплитуда выходного сигнала задающего генератора, в результате чего в обмотках возбуждения устанавливаются значения токов:

$$I_{e1}(t) = I_{01} + I_{m1} \cdot \sin \Omega t; I_{e2}(t) = I_{02} + I_{m2} \cdot \sin(\Omega t - \Delta \varphi),$$

где $\Delta \varphi$ – угол сдвига переменной составляющей тока возбуждения компенсатора.

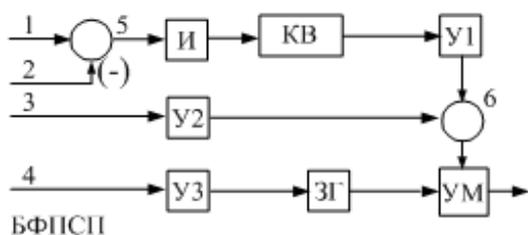


Рисунок 4 – Структура блока формирования переменной составляющей потока

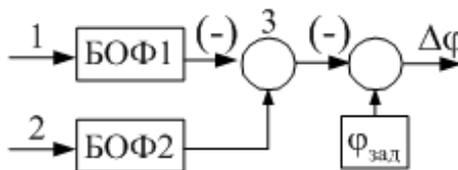


Рисунок 6 – Структурная схема формирования угла сдвига переменной составляющей

Принцип работы блока БФПСП1 следующий: на вход 1 поступает сигнал, равный номинальному значению тока двигателя, на вход 2 сигнал эффективного значения тока с датчика эффективного тока ДЭТ; разность этих сигналов поступает на вход интегратора, с выхода которого сигнал поступает на масштабирующий усилитель У1, который одновременно с блоком временной задержки, усилителем У2 и сумматором 6 формирует амплитуду переменной составляющей потока возбуждения. Усилитель У3 формирует частоту сигнала задающего генератора. Амплитуда переменной составляющей потока увеличивается до тех пор, пока эффективное значение тока не станет равным его номинальному значению.

Блок БФПСП2 работает по такому же алгоритму с тем отличием, что входным сигналом 1 является сигнал эффективного тока испытываемой машины, а входным сигналом 2 – сигнал датчика эффективного тока компенсатора. Угол сдвига, при котором осуществляется режим компенсации, формируется на основании структурной схемы, изображенной на рис. 5.

Принцип работы следующий: на вход 1 поступает сигнал мгновенного значения тока двигателя, на вход 2 – мгновенного значения тока компенсатора, после чего с использованием аппарата Фурье определяются углы фазовых сдвигов переменных составляющих этих токов (БОФ1, БОФ2); компаратор 3 вычисляет разность фаз между векторами токов; далее к полученному сигналу суммируется значение заданного угла $\varphi_{зад}$ и сформированный сигнал приходит на ЗГ блока БФПСП2.

На основании структурной схемы (рис. 3) синтезирована математическая модель в пакете Matlab, с использованием которой исследованы режимы компенсации при изменении соотношения мощностей исследуемого двигателя и накопителя для трех случаев.

1) ИД и НКУ по мощности и параметрам одинаковые. В качестве нагружаемой машины и компенсатора выбраны машины ПЗ1М с параметрами: $P_n=1.4$ кВт; $U_n=220$ В; $I_n=8.7$ А; $n_n=1500$ об/мин; $\eta_n=91\%$; $R_\pi=2.781$ Ом; $L_\pi=0.094$ Гн; $U_{ов}=220$ В; $R_{ов}=314$ Ом; $L_{ов}=32$ Гн; $a=0.0016$ Н·м/с⁻¹ (рис.6-9);

2) мощность ИД больше в 6,5 раз мощности компенсатора. Параметры нагружаемой машины $P_n=9$ кВт; $U_n=220$ В; $I_n=39.4$ А; $n_n=1500$ об/мин; $\eta_n=91\%$; $R_\pi=0.1$ Ом; $L_\pi=0.0089$ Гн; $U_{ов}=220$ В; $R_{ов}=162$ Ом; $a=0.00113$ Н·м/с⁻¹, компенсатора $P_n=1.4$ кВт; $U_n=220$ В; $I_n=8.7$ А; $n_n=1500$ об/мин; $\eta_n=91\%$; $R_\pi=2.781$ Ом; $L_\pi=0.094$ Гн;

$U_{ов}=220$ В; $R_{ов}=314$ Ом; $L_{ов}=32$ Гн; $a=0.0016$ Н·м/с⁻¹ (рис. 10-13);

3) мощность НКУ больше в 6,5 раз мощности двигателя. Параметры нагружаемой машины $P_n=1.4$ кВт; $U_n=220$ В; $I_n=8.7$ А; $n_n=1500$ об/мин; $\eta_n=91\%$; $R_\pi=2.781$ Ом; $L_\pi=0.094$ Гн; $U_{ов}=220$ В; $R_{ов}=314$ Ом; $L_{ов}=32$ Гн; $a=0.0016$ Н·м/с⁻¹, компенсатора $P_n=9$ кВт; $U_n=220$ В; $I_n=39.4$ А; $n_n=1500$ об/мин; $\eta_n=91\%$; $R_\pi=0.1$ Ом; $L_\pi=0.0089$ Гн; $U_{ов}=220$ В; $R_{ов}=162$ Ом; $a=0.00113$ Н·м/с⁻¹ (рис. 14-17).

С использованием математической модели исследованы динамические характеристики частот вращения, угла сдвига, эффективные и мгновенные значения токов двигателя, компенсатора и источника питания для трех случаев.

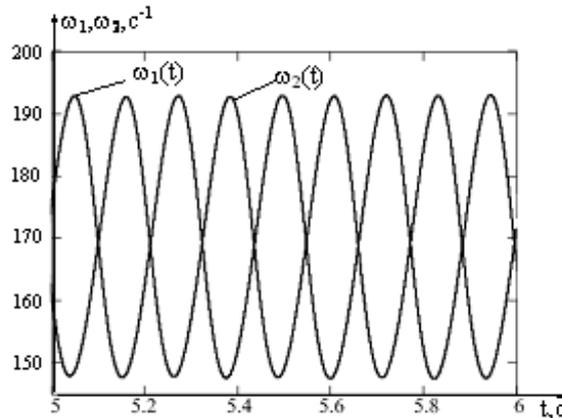


Рисунок 6 – Зависимости частот вращения двигателя и компенсатора

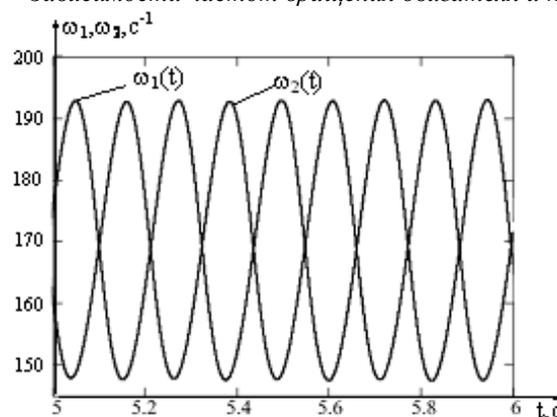


Рисунок 7 – Зависимости мгновенных значений токов двигателя, компенсатора и источника питания

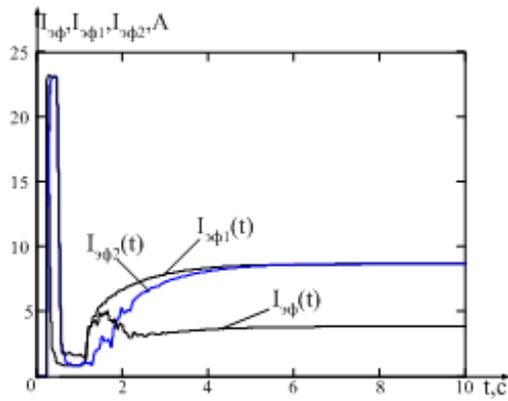


Рисунок 8 – Зависимости эффективных токов двигателя, компенсатора и источника питания

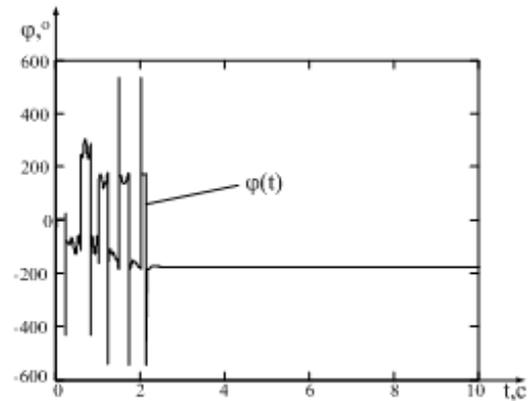


Рисунок 9 – Зависимость угла сдвига переменной составляющей тока возбуждения компенсатора

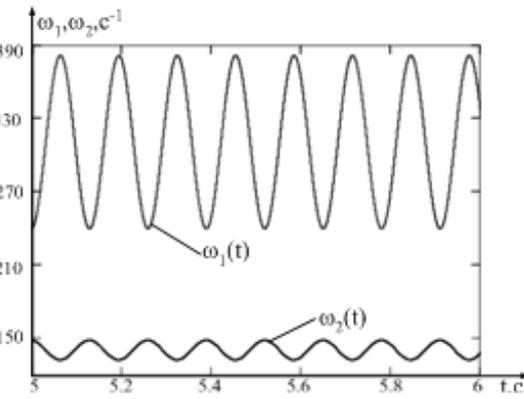


Рисунок 10 – Зависимости частот вращения двигателя и компенсатора

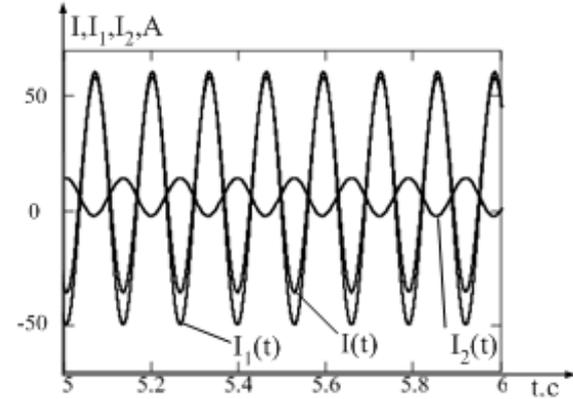


Рисунок 11 – Зависимости мгновенных значений токов двигателя, компенсатора и источника питания

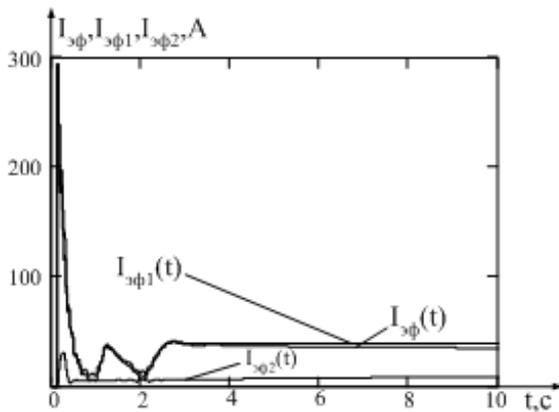


Рисунок 12 – Зависимости эффективных токов двигателя, компенсатора и источника питания

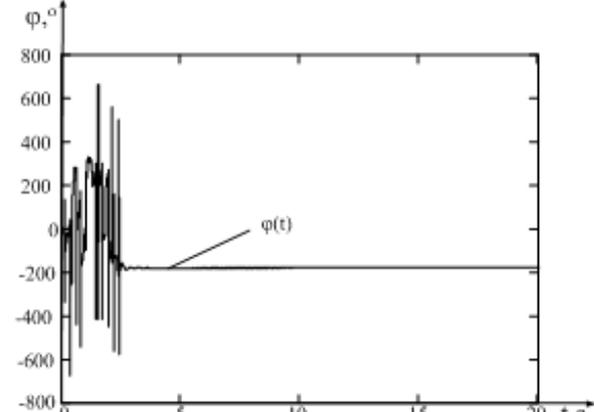


Рисунок 13 – Зависимость угла сдвига переменной составляющей тока возбуждения компенсатора

Выводы. Из полученных графиков для трех случаев можно сделать следующие выводы: получение режима нагружения и компенсации возможно для всех случаев, однако необходимо соблюдение условия $\omega_1 = \omega_2$. В противном случае эффект компенсации не наблюдается. Оптимальный угол сдвига переменной составляющей тока возбуждения во всех случаях равен 180° . Нагружать компенсатор больше и меньше номинального тока нецелесообразно, поскольку в первом случае значение тока потребляемого из сети увеличивается, а во втором коэффициент полезного действия установки уменьшается. Однако следует отметить, что только когда машины одинаковые возможно добиться потребляемого от источника питания знакопостоянного тока, что позволит использовать неререверсивный тиристорный преобразователь для питания якорной цепи.

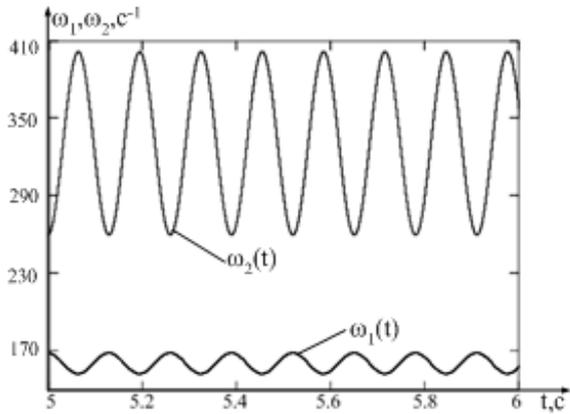


Рисунок 14 – Зависимости частот вращения двигателя и компенсатора

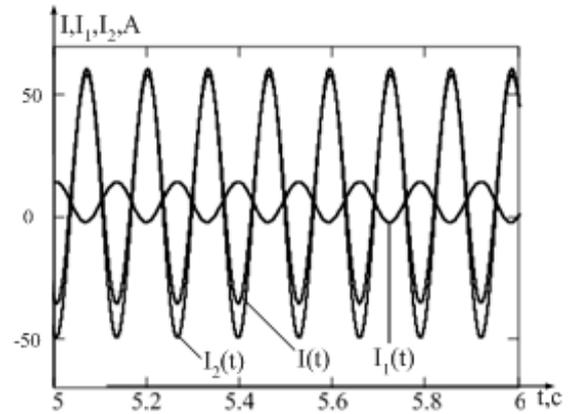


Рисунок 15 – Зависимости мгновенных значений токов двигателя, компенсатора и источника питания

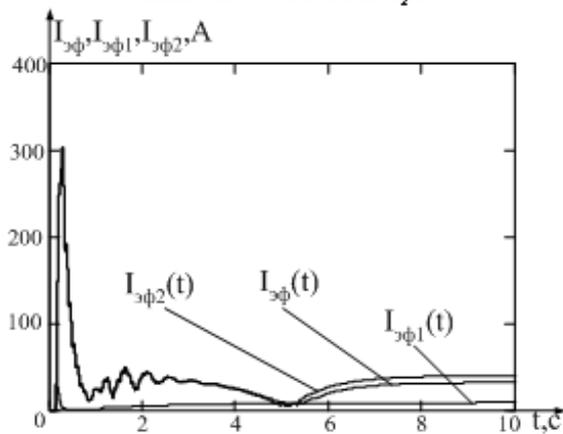


Рисунок 16 – Зависимости эффективных токов двигателя, компенсатора и источника питания

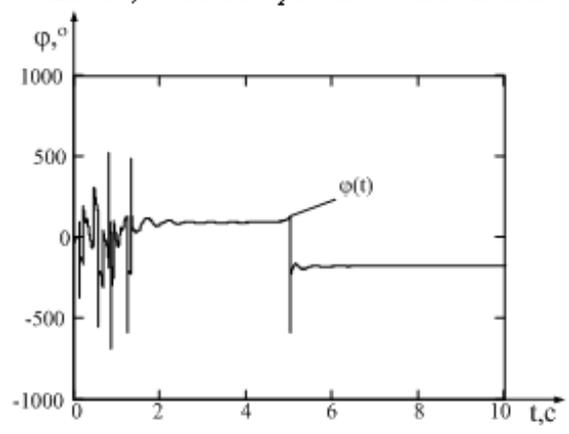


Рисунок 17 – Зависимость угла сдвига переменной составляющей тока возбуждения компенсатора

Эффект компенсации наибольший в первом случае, а наименьший – во втором и третьем, поэтому максимального эффекта компенсации можно добиться, когда машины одинаковые или соотношение мощностей между ИД и НКУ незначительно. Случай, когда в качестве НКУ используется машина большей мощности, можно применять для одновременного исследования нескольких машин. В ходе исследований выявлена возможность получения режимов нагружения и компенсации, когда номинальные значения частот вращения и потоков не равны между собой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Родькин Д.И. Системы динамического нагружения и диагностики электродвигателей при послеремонтных испытаниях. – М.: Недра, 1992. – 236 с.
2. Кривонос С.А., Бялобржеский А.В., Ломонос А.И. Параметры и режимы работы оборудования станций динамического нагружения // Вісник КДПУ, 2002, вып. 2. – С. 136-140.
3. Бут Д.А., Алиевский Б.Л., Мизюрин С.Р., Васюкевич П.В. Накопители энергии: Учеб. пособие для вузов. Под ред. Д.А. Бута. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 400 с.
4. Ломонос А.И., Бялобржеский А.В., Горбань С.Н. Параметры оборудования систем динамического нагружения с накопителями-компенсаторами // Вісник КДПУ, 2004, вып. 2. – С. 126-130.
5. Ломонос А.И., Бялобржеский А.В. Принципы построения регулятора нагрузки системы испытания машин постоянного тока с электромеханическим накопителем энергии // Вісник КДПУ, 2005, вып. 4. – С.47-52.
6. Сулим А.А., Ломонос А.И. Исследование процессов в системе динамического нагружения машины постоянного тока с электромеханическим накопителем в якорной цепи. // Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КДПУ. – 2008. – Вип.. 3/2008(50), ч.2. – с.105-112.
7. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами: учебное пособие для вузов. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1982. – 392 с.
8. Мандровский-Соколов Б.Ю., Туник А.А. Системы экстремального управления: Справочник. – К.: Наукова думка, 1970. – 172 с.

Рекомендовано д.т.н. Толочко О.І.