

УДК 621.3.012.6:621.313.2

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ ДИНАМИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ
МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМ
НАКОПИТЕЛЕМ В ЯКОРНОЙ ЦЕПИ**

Сулим А.А., магистрант, Ломонос А.И., ст. преп.

*Кременчугский государственный политехнический университет имени Михаила Остроградского
39614, г. Кременчуг, ул. Первомайская, 20*

E-mail: saue@polytech.poltava.ua

У роботі синтезована математична модель системи динамічного навантаження з електромеханічним компенсатором, за допомогою якої досліджено режими роботи джерела живлення, випробуваної машини і компенсатора при зміні скважності імпульсів керування збудження компенсатора і двигуна та для різних значень кута зсуву фаз між змінними складовими струмів збудження електричних машин. Проведено експериментальні дослідження залежностей струмів та потужностей досліджуваної машини, компенсатора та джерела живлення для режимів навантаження та компенсації.

Ключові слова: компенсатор, машина постійного струму, система динамічного навантаження, джерело живлення, імпульс керування, обмотка збудження.

In work the mathematical model of the system of the dynamic loading is synthesized with electromechanics compensate, by which explored modes of operations of source of feed, tested machine and compensate at the change of skvazhnosti impulses of management of excitation of compensate and engine and for the different values of corner of change of phases between variables component of currents of excitation of electric machines. Experimental researches of dependences of currents and powers of the explored machine, compensate and source of feed for the modes of loading and indemnification are conducted.

Key words: compensate, machine of direct current, system of the dynamic loading, source of feed, management impulse, puttee of excitation.

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. 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.

Анализ предыдущих исследований. В электро-ремонтных 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 долговре-

мен в связи с закреплением двигателя на фундаментной плите и механическим агрегированием).

Системы динамического нагружения являются перспективным видом испытательного оборудования электрических машин. Из работ [1, 2] известно, что в системах динамического нагружения машин постоянного тока (МПТ), работающих в режимах динамического нагружения, за счет формирования знакопеременного электромагнитного момента, обеспечивающего необходимую токовую нагрузку, циркулирует знакопеременная мощность, колебания которой, с одной стороны, оказывают негативное влияние на снабжающую сеть и других потребителей, а с другой, – приводят к необходимости установки силового трансформаторного и преобразовательного оборудования повышенной мощности. Для снижения указанных недостатков в работах [3, 4] предложено применение различного рода накопителей энергии.

В работе [5] 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 сис-

темы 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 [6].

Цель работы – исследование режимов компенсации переменной составляющей мощности в системе динамического нагружения машин постоянного тока, при которых потребляемый от источника ток будет знакопостоянным и минимальным.

Материал и результаты исследования. Для реализации систем динамического нагружения могут быть использованы определенные технические решения [1, 7]. При этом блоки, входящие в структуру схемы нагружения, реализуются функциональными элементами принципиально различного исполнения.

Функциональная схема системы динамического нагружения МПТ приведена на рис. 1.

Система уравнений, описывающих процессы в схеме, имеет вид:

$$\begin{aligned}
 U(t) &= I_{\Sigma}(t) \cdot R_{\Sigma} + L_{\Sigma} \cdot \frac{dI_{\Sigma}(t)}{dt} + I_{я1}(t) \cdot R_{я1} + \\
 &+ L_{я1} \cdot \frac{dI_{я1}(t)}{dt} + k\Phi_1(t) \cdot \omega_1(t); \\
 U(t) &= I_{\Sigma}(t) \cdot R_{\Sigma} + L_{\Sigma} \cdot \frac{dI_{\Sigma}(t)}{dt} + I_{я2}(t) \cdot R_{я2} + \\
 &+ L_{я2} \cdot \frac{dI_{я2}(t)}{dt} + k\Phi_2(t) \cdot \omega_2(t); \\
 I_{\Sigma}(t) &= I_{я1}(t) + I_{я2}(t); \\
 E_1(t) &= k\Phi_1(t) \cdot \omega_1(t); \quad E_2(t) = k\Phi_2(t) \cdot \omega_2(t); \\
 k\Phi_1 &= c_1(I_{в1}); \quad k\Phi_2 = c_2(I_{в2}); \\
 U_{в1}(t) &= I_{в1}(t) \cdot R_{в1} + \frac{d}{dt} \{L_{в1}(I_{в1}) \cdot I_{в1}\}; \\
 U_{в2}(t) &= I_{в2}(t) \cdot R_{в2} + \frac{d}{dt} \{L_{в2}(I_{в2}) \cdot I_{в2}\}; \\
 I_{я1}(t) \cdot k\Phi_1(t) &= M_{01}(t) + J_1 \cdot \frac{d\omega_1(t)}{dt}; \\
 I_{я2}(t) \cdot k\Phi_2(t) &= M_{02}(t) + J_2 \cdot \frac{d\omega_2(t)}{dt},
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где E_{Σ} , R_{Σ} и X_{Σ} – Э.Д.С., активное и индуктивное сопротивление 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; $U_{в1}(t)$, $U_{в2}(t)$, $I_{в1}(t)$, $I_{в2}(t)$ – напряжения и токи в цепях возбуждения электрических машин; $R_{в1}$, $R_{в2}$, $L_{в1}$, $L_{в2}$ – 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 сопротив-

ления 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.

На основании системы (1) запишем уравнение баланса мощности в системе нагружения:

$$\begin{aligned}
 U(t) \cdot I(t) &= I_{\Sigma}^2(t) \cdot R_{\Sigma} + I_{\Sigma}(t) \cdot L_{\Sigma} \cdot \frac{dI_{\Sigma}(t)}{dt} + \\
 &+ I_{я1}^2(t) \cdot R_{я1} + I_{я1}(t) \cdot L_{я1} \cdot \frac{dI_{я1}(t)}{dt} + I_{я2}^2(t) \cdot R_{я2} + \\
 &+ I_{я2}(t) \cdot L_{я2} \cdot \frac{dI_{я2}(t)}{dt} + M_{01}(t) \cdot \omega_1(t) + M_{02}(t) \cdot \omega_2(t) \\
 &+ J_1 \cdot \omega_1(t) \cdot \frac{d\omega_1(t)}{dt} + J_2 \cdot \omega_2(t) \cdot \frac{d\omega_2(t)}{dt},
 \end{aligned}$$

где составляющие в правой части соответствуют потерям на активных сопротивлениях, механическим потерям, знакопеременным составляющим мощности на индуктивностях и вращающихся частях испытуемой машины и компенсатора.

Как отмечалось в работах [5, 6], при условии компенсации знакопеременных составляющих мощности, суммарная потребляемая мощность источника питания идет на покрытие потерь, возникающих в системе нагружения. Однако, ввиду невозможности полной компенсации знакопеременной мощности, необходимо выполнение экспериментальных исследований режимов ее компенсации в системе динамического нагружения (СДН).

Как показано в [6], даже при гармоническом изменении магнитного потока электрической машины ток в ее якорной цепи будет несинусоидальным. Поэтому при выполнении исследований необходимо анализировать гармонический состав тока источника питания.

Для исследования режимов динамического нагружения электрических машин на гармонический состав токов источника, испытуемой машины и компенсатора, на основании системы (1) разработана математическая модель (рис. 3).

Выполнено моделирование в режимах динамического нагружения двух машин постоянного тока. В качестве нагружаемой машины и компенсатора выбраны машины ПЗ1М с параметрами: $P_{н}=1.4$ кВт; $U_{н}=220$ В; $I_{н}=8.7$ А, $n_{н}=1500$ об/мин; $\eta_{н}=91$ %; $R_{я}=2.781$ Ом; $L_{я}=0.094$ Гн; $U_{ов}=220$ В; $R_{ов}=314$ Ом;

$$L_{ов}=32 \text{ Гн}; \quad a=0.0016 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{с}^{-1}}.$$

Импульс управления, подаваемый на систему управления широтно-импульсного преобразователя (ШИП), будет иметь вид, приведенный на рис. 2. При этом амплитуда сигнала U_y и коэффициент заполнения импульсов γ определялись в ходе математического моделирования исходя из требований к режиму нагружения.

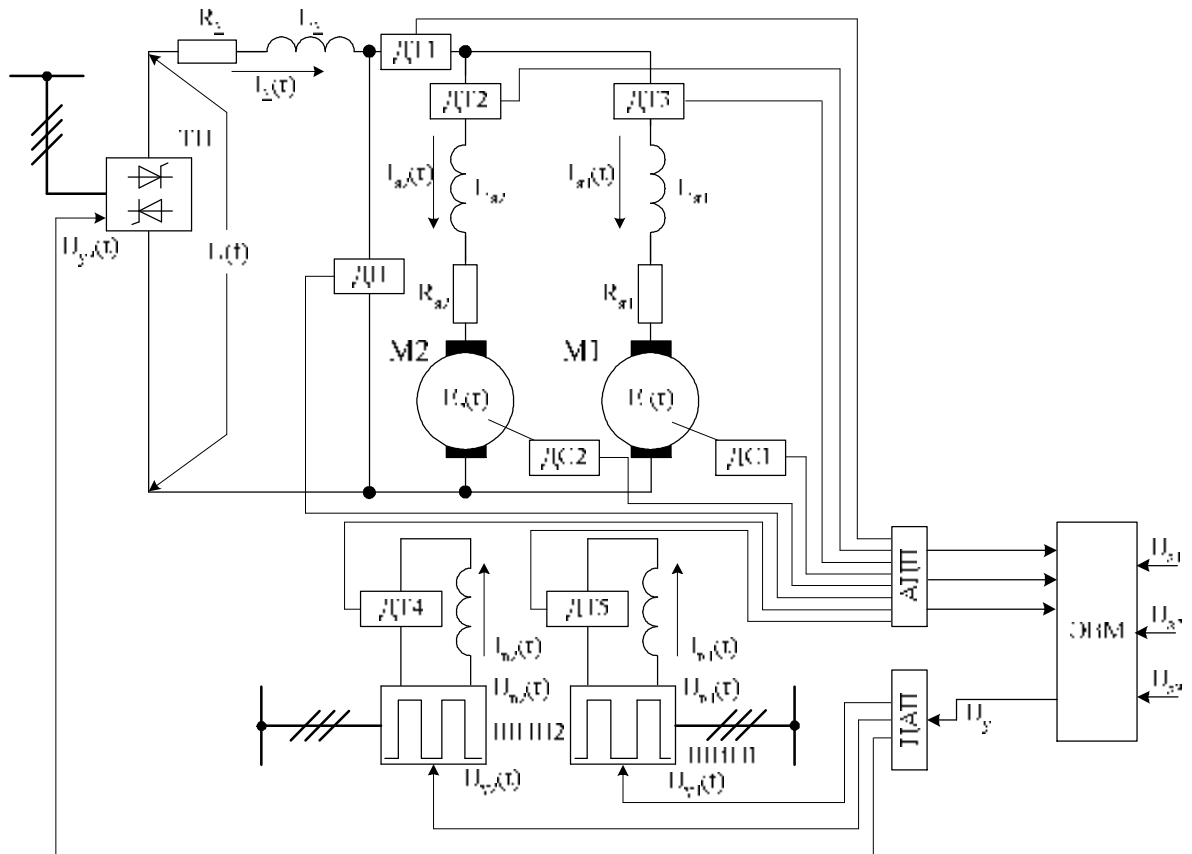


Рисунок 1 – Функціональна схема системи динамічного навантаження МТТ з компенсатором

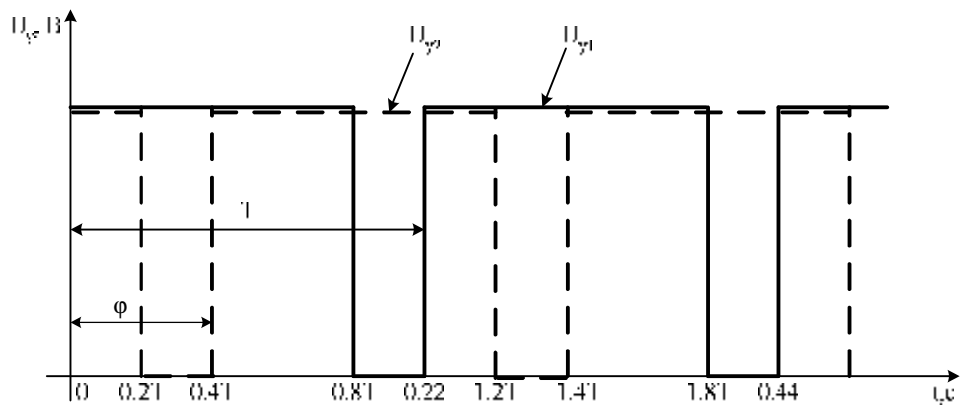


Рисунок 2 – Формирование импульсов управления преобразователями ШИП1, ШИП2 в режиме компенсации

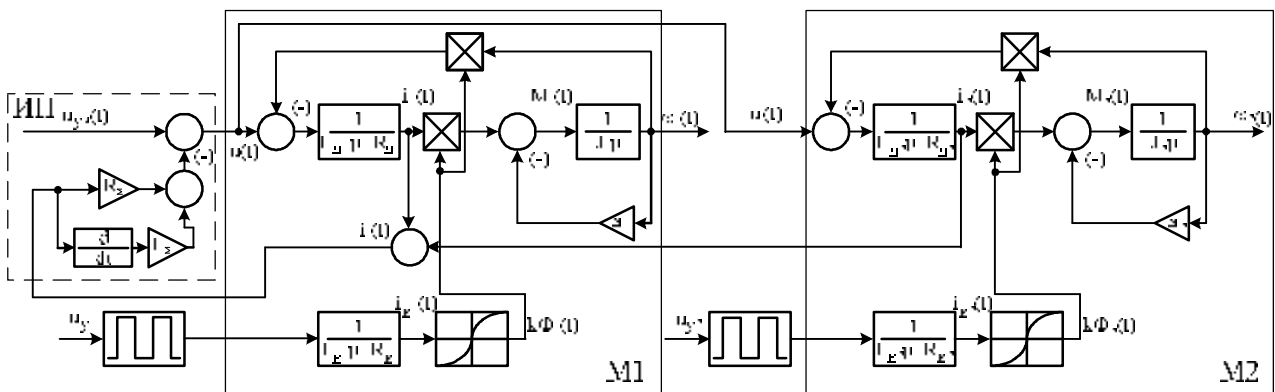
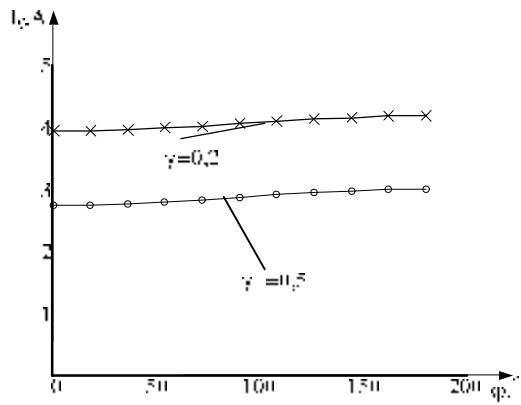
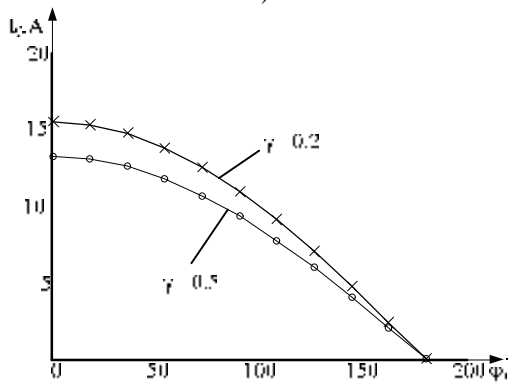


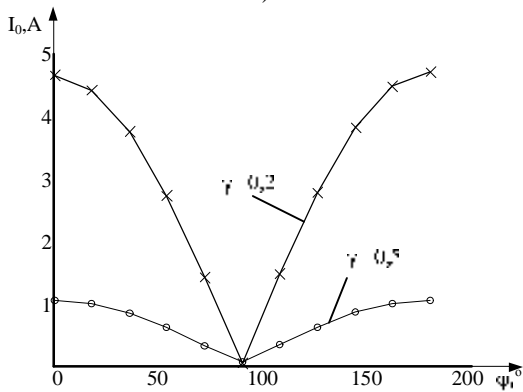
Рисунок 3 – Математическая модель системы динамического нагружения МТТ в пакете Matlab



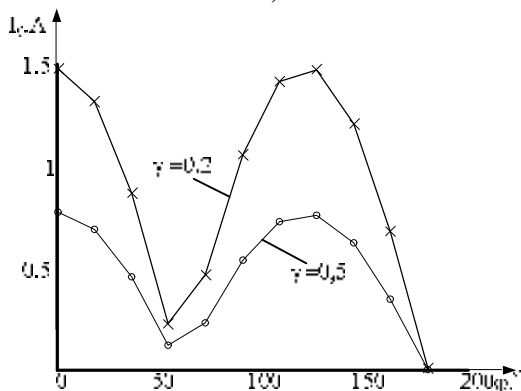
а)



б)

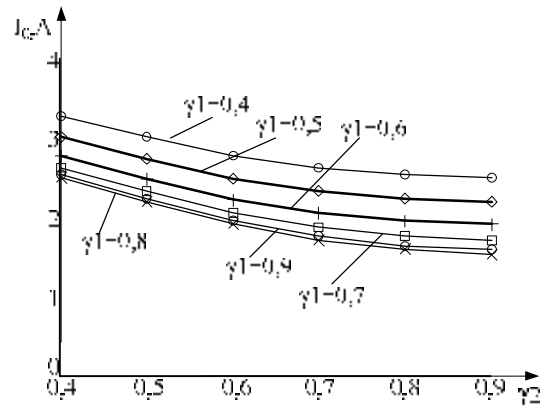


в)

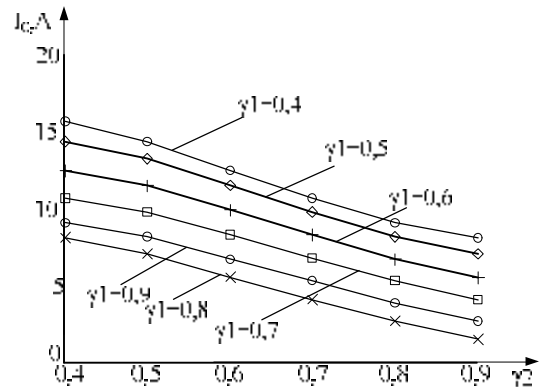


г)

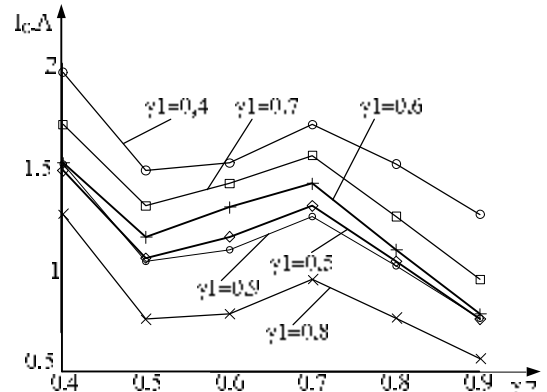
Рисунок 4 – Зависимости среднего значения (а) и амплитуд первой (б), второй (в), третьей (г), гармоник тока источника питания при изменении угла сдвига фаз напряжения U_{y2} относительно U_{y1}



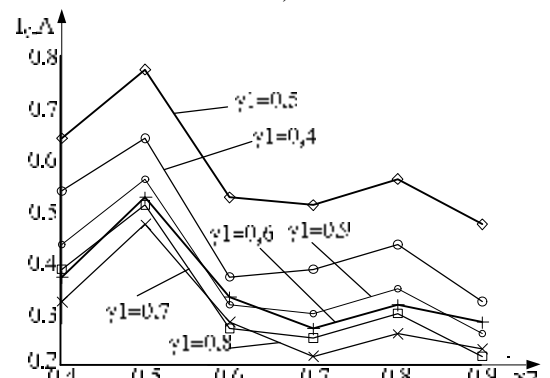
а)



б)



в)



г)

Рисунок 5 – Зависимости среднего значения (а) и амплитуд первой (б), второй (в), третьей (г), гармоник тока источника питания при изменении скважности управляющего импульса компенсатора

На основанні алгоритма роботи системи динамічного навантаження МПТ, приведенного в [6], досліджені режими роботи системи навантаження при сдвигу сигналу управління возбудителем компенсатора в діапазоні від 0 до 180° відносно сигналу управління возбудителем досліджуваної машини (φ – кут сдвигу керуючих імпульсів) при скважності імпульсів, подаваних на возбудитель двигача і компенсатора $\gamma_1=0.2, \gamma_2=0.2$ в першому випадку, $\gamma_1=0.5, \gamma_2=0.5$ во другому випадку (де γ_1 – скважність імпульсу, подаваного на ШИП1; γ_2 – скважність імпульсу, подаваного на ШИП2). Також досліджені режими роботи з змінюючою скважністю імпульсів, подаваних на ШИП1 і ШИП2 відповідно досліджуваного двигача (ІД) і компенсатора в діапазоні $\gamma_1=0.4 - 0.9$ і $\gamma_2=0.4 - 0.9$ при $\varphi=0$.

Результати досліджень гармонічного складу току джерела живлення приведені на рис. 4, 5.

Аналізуючи графіки залежностей можна зробити наступні висновки: змінення кута сдвигу імпульсу управління компенсатора відносно початку імпульсу управління двигачем дозволяє домогтися режиму компенсації. Найбільш яскраво ефект компенсації виражений при $\varphi=180^\circ$ (перша і третя гармоніки) і при $\varphi=90^\circ$ (друга гармоніка) (рис. 3). Характер кривих джерела струму при різних скважностях імпульсів однаковий, але амплітудне значення різне. Для першої і другої гармоніки струму джерела живлення найвище амплітудне значення при $\gamma_2=0.4$, для третьої – при $\gamma_2=0.5$. З зменшенням скважності імпульсів компенсатора і двигача збільшується амплітуда коливань струму джерела живлення на всіх гармоніках, тому найбільш ефективними є режими навантаження при скважності в діапазоні $\gamma_1=0.8 - 0.9$ і $\gamma_2=0.8 - 0.9$ (рис. 4).

З використанням математичної моделі СДН з накопичувально-компенсуючим пристроєм (НКУ) досліджені режими компенсації при зміні співвідношення потужностей досліджуваного двигача і накопичувача для трьох випадків:

- ІД і НКУ по потужності і параметрам однакові В якості навантажувачої машини і компенсатора обрані машини ПЗ1М з параметрами: $P_H=1.4$ кВт; $U_H=220$ В; $I_H=8.7$ А; $n_H=1500$ об/мін; $\eta_H=91\%$; $R_\pi=2.781$ Ом; $L_\pi=0.094$ Гн; $U_{об}=220$ В;

$R_{об}=314$ Ом; $L_{об}=32$ Гн; $a=0.0016 \frac{H \cdot M}{c^{-1}}$ (рис. 6, 7);

- потужність ІД більше в 6,5 раз потужності компенсатора. Параметри навантажувачої машини $P_H=9$ кВт; $U_H=220$ В; $I_H=39.4$ А; $n_H=1500$ об/мін; $\eta_H=91\%$; $R_\pi=0.1$ Ом; $L_\pi=0.0089$ Гн; $U_{об}=220$ В;

$R_{об}=162$ Ом; $a=0.00113 \frac{H \cdot M}{c^{-1}}$, компенсатора

$P_H=1.4$ кВт; $U_H=220$ В; $I_H=8.7$ А; $n_H=1500$ об/мін; $\eta_H=91\%$; $R_\pi=2.781$ Ом; $L_\pi=0.094$ Гн; $U_{об}=220$ В;

$R_{об}=314$ Ом; $L_{об}=32$ Гн; $a=0.0016 \frac{H \cdot M}{c^{-1}}$ (рис. 8, 9);

- потужність ІД більше потужності компенсатора приблизно в 2 рази. ІД з номінальними параметрами $P_H=17$ кВт; $U_H=220$ В; $I_H=86.9$ А; $n_H=3000$ об/мін; $\eta_H=89\%$; $R_\pi=0.038$ Ом; $L_\pi=0.0014$ Гн; $U_{об}=220$ В;

$R_{об}=132$ Ом; $a=0.059 \frac{H \cdot M}{c^{-1}}$, компенсатор: $P_H=9$ кВт;

$U_H=220$ В; $I_H=39.4$ А; $n_H=3000$ об/мін; $\eta_H=91\%$; $R_\pi=0.1$ Ом; $L_\pi=0.0089$ Гн; $U_{об}=220$ В; $R_{об}=162$ Ом;

$a=0.00113 \frac{H \cdot M}{c^{-1}}$ (рис. 10, 11).

Результати, отримані в ході математичного моделювання представлені на рис.6-11.

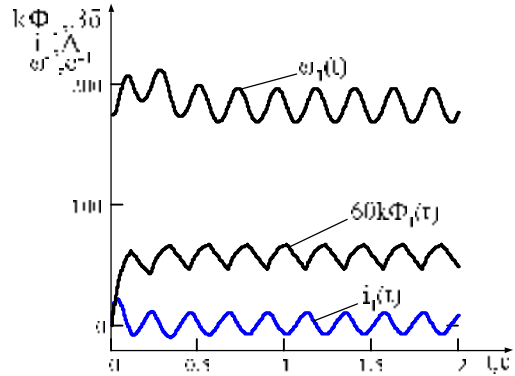


Рисунок 6 – Залежності струму, потоку, частоти обертання двигача при $\varphi=180^\circ$

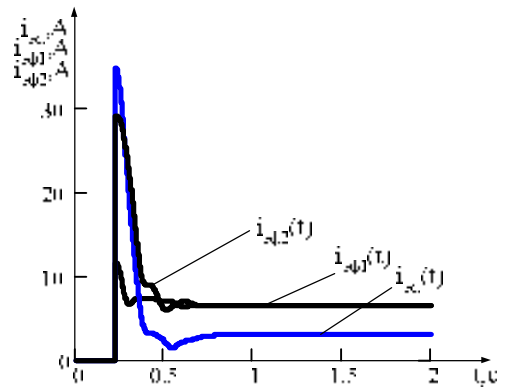


Рисунок 7 – Залежності ефективного значення струму джерела живлення і двигача при $\varphi=180^\circ$

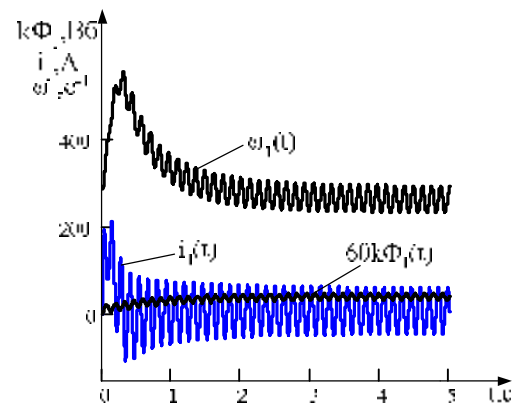


Рисунок 8 – Залежності струму, потоку, частоти обертання двигача при $\varphi=180^\circ$

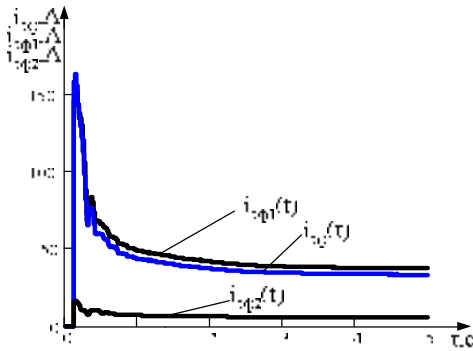


Рисунок 9 – Зависимости эффективного значения тока источника питания и двигателя при $\varphi=180^\circ$

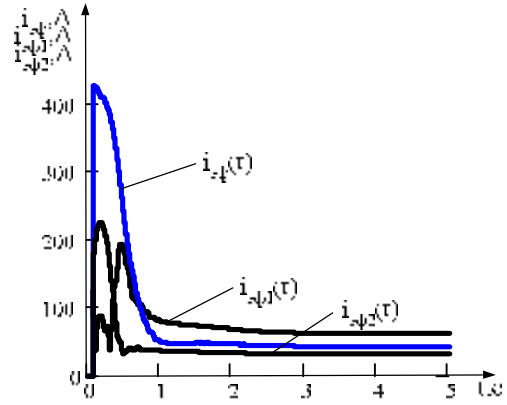


Рисунок 11 – Зависимости эффективного значения тока источника питания и двигателя при $\varphi=180^\circ$

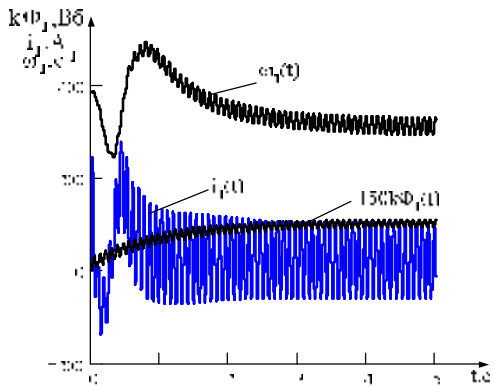


Рисунок 10 – Зависимости тока, потока, частоты вращения двигателя при $\varphi=180^\circ$

Анализ графиков позволяет сделать следующие выводы: возможно получение режима компенсации при разных мощностях ИД и НКУ, однако нецелесообразно устанавливать НКУ с мощностью намного меньшей, чем мощность ИД, поскольку эффект компенсации при этом невелик; наиболее эффект компенсации выражен при одинаковой мощности ИД и НКУ.

На основании функциональной схемы системы динамического нагружения (рис. 1) разработана схема экспериментальной установки системы нагружения машин постоянного тока с компенсатором (рис. 14).

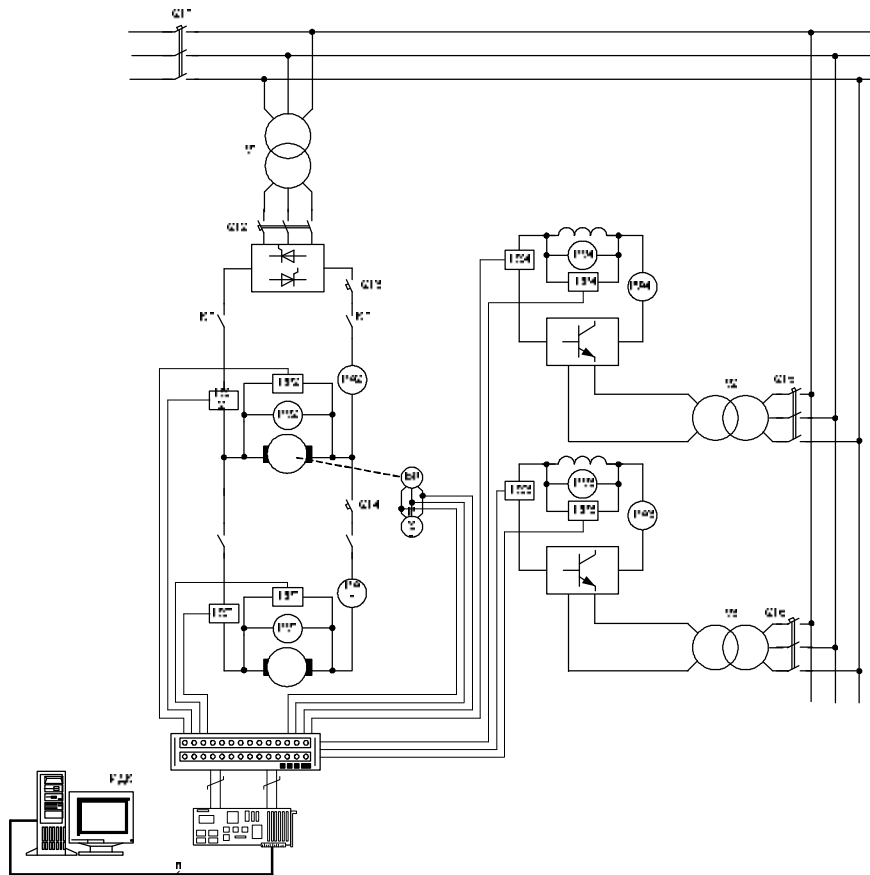


Рисунок 14 – Схема экспериментальной установки системы динамического нагружения МПТ с компенсатором

Режим компенсации осуществляется подачей на систему управления преобразователем ШИП2 импульса, сдвинутого относительно сигнала, подаваемого на преобразователь ШИП1, по оси абсцисс на заданный интервал времени (рис. 2).

Для определения диапазона, при котором будет достигнут максимальный эффект компенсации переменной составляющей мощности, проведено экспериментальное исследование при сдвиге импульса управления, подаваемого на преобразователь ШИП2, по оси абсцисс от 0 до $0.9T$ (где T – период нагружения).

Результаты экспериментального исследования зависимостей токов и мощностей испытываемой машины (I_1 , $P_1 = U \cdot I_1$), компенсатора (I_2 ,

$P_2 = U \cdot I_2$) и источника питания (I , $P = U \cdot I$) для наиболее показательных режимов компенсации приведены на рис.15.

При отсутствии сдвига между импульсами управления возбудителей машин М1 и М2 ток источника равен сумме токов обеих машин, поэтому его амплитуда имеет максимальное значение и он является знакопеременным, что требует использования реверсивного источника питания. При сдвиге на $\varphi=0.5T$ режим компенсации является наиболее эффективным, поскольку ток источника знакопостоянный, следовательно необходимо использовать неревверсивный источник питания якорной цепи (рис. 15, в, г)).

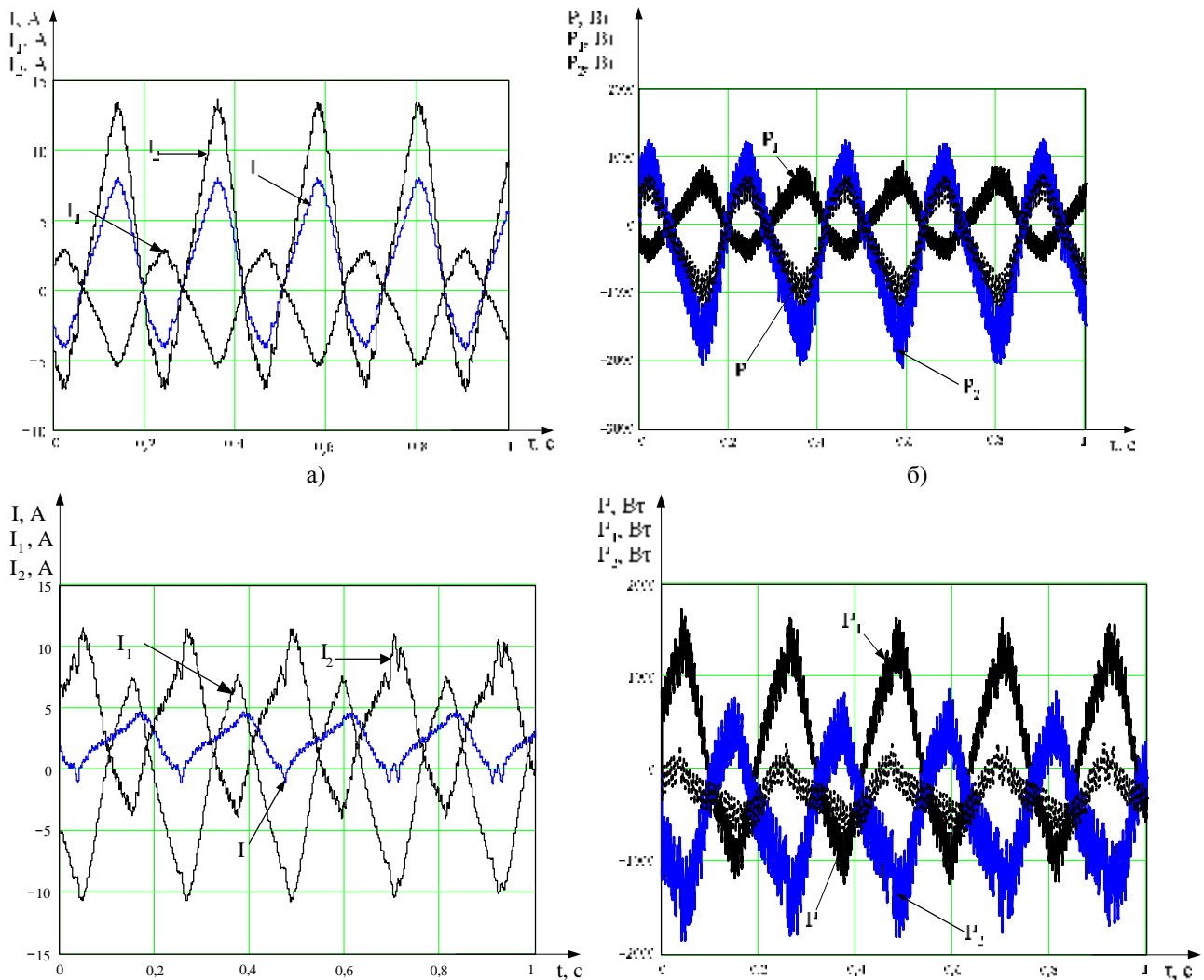


Рисунок 15 – Зависимости токов якорной цепи (а, в), мощностей (б, г) при сдвиге на $\varphi=0$ и $\varphi=0.5T$

Разложив результаты экспериментальных исследований при изменении скважности импульсов, подаваемых на ШИП1 и ШИП2 соответственно ИД и компенсатора в диапазоне $\gamma_1=0.4 - 0.9$ и $\gamma_2=0.4 - 0.9$ при $\varphi=0$ в ряд Фурье, получен гармонический состав тока источника питания.

Результаты экспериментального исследования

гармонического состава тока источника питания приведены на рис. 16.

Анализ гармонического состава экспериментальных исследований тока источника питания (рис. 13) показывает, что наименьшее колебание тока источника питания при скважности $\gamma_1=0.9$ и $\gamma_2=0.9$.

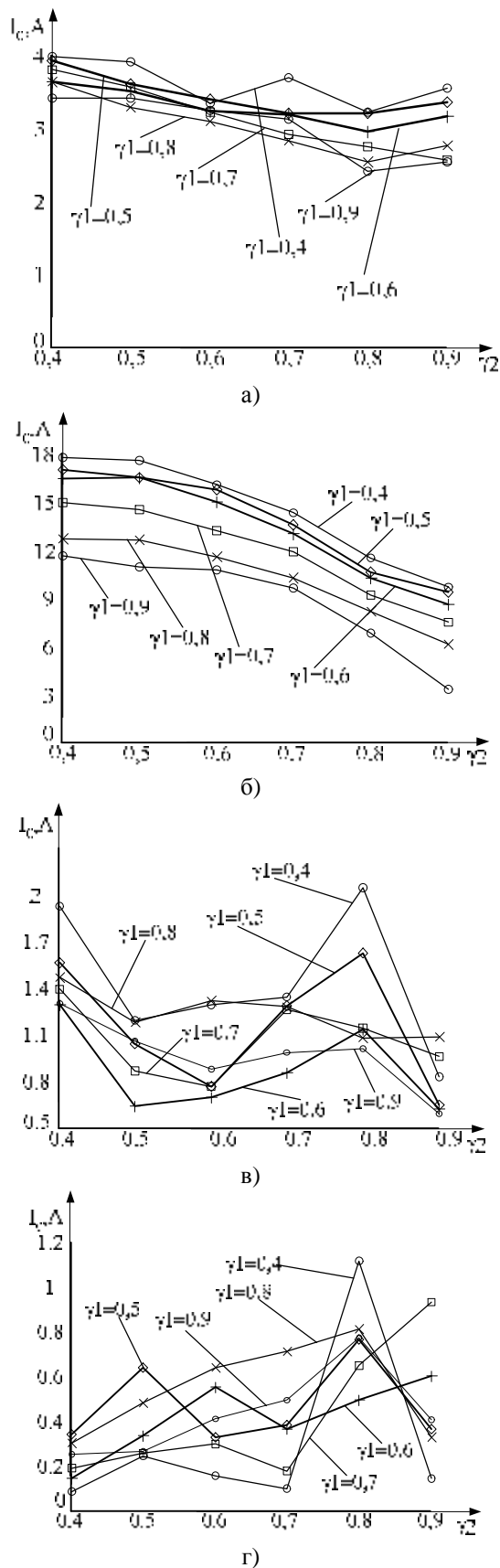


Рисунок 16 – Зависимости среднего значения (а) и амплитуд первой (б), второй (в), третьей (г), гармоник тока источника питания при изменении скважности управляющего импульса компенсатора

Выводы. Сравнивая результаты, полученные математическим путем и в процессе экспериментальных исследований при изменении скважности управляющих импульсов, следует отметить, что характер изменения графиков одинаков, а наиболее эффективными являются режимы при скважности управляющих импульсов в диапазоне 0.8 – 0.9.

Результаты исследования показывают, что уменьшается ток источника питания при изменении соотношения мощностей исследуемого двигателя и накопительно-компенсирующего устройства, однако только при одинаковых машинах постоянного тока возможно добиться знакопостоянства потребляемого от источника питания тока, поэтому в случае одинаковых МПТ необходима разработка режимов нагружения и компенсации, в которых ток, потребляемый от источника питания, будет иметь минимальное и знакопостоянное значение

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. Астахов Ю.Н., Веников В.А., Тер-Газарян А.Г. Накопители энергии в электрических системах: Учеб. пособие для электроэнергет. спец. вузов. – М.: Высш. шк., 1989. – 159 с.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. Бялобржеский А.В., Ломонос А.И., Гордиенко М.Г. и др. Исследовательские компьютеризированные лабораторные комплексы // Вісник НТУ „ХПІ”. Збірник наукових праць. Тематичний випуск „Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика”. – Харків: НТУ „ХПІ”, 2003, №10. – Т.2. – С. 292-297.

Стаття надійшла 11.04.2008 р.
Рекомендовано до друку д.т.н., проф.
Родькіним Д.Й.