

ження, тока статора и знака производной момента по углу нагрузки. Причем быстродействие указанных режимов существенно выше по сравнению с существующими устройствами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Правила устройства электроустановок / Минэнерго СССР. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 640с.
2. Постников И.М. Обобщенная теория и переходные процессы электрических машин / И.М.Постников. – М.: Высшая школа, 1975. – 319с.

Поступила в редколлегию 01.12.2014.

УДК 621.313.31.075

ЗАЧЕПА Ю.В., к.т.н., доцент

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА З ЖИВЛЕННЯМ СПОЖИВАЧІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Вступ. В умовах енергетичної нестабільності заповнити відсутність централізованого енергопостачання, у тому числі й у віддалених або економічно нерозвинених районах можуть автономні енергетичні установки (АЕУ) малої потужності. Необхідність в АЕУ виникає там, де технічно неможливо або економічно невигідно використовувати централізоване електропостачання. У зазначених системах електроживлення досить широкого застосування набули синхронні генератори (СГ). Але поряд з ними також застосовують асинхронні генератори (АГ). Ці генератори мають низку переваг порівняно з СГ (безконтактне виконання, простота ввімкнення на паралельну роботу, безпека режиму короткого замикання) [1].

Питанням математичного та фізичного моделювання АГ багато уваги приділяється в працях вітчизняних і зарубіжних учених, що дозволило розв'язати задачі щодо створення математичної бази з дослідження автономних АГ з різними системами збудження в статичних режимах і в режимах гарантованого самозбудження при роботі на симетричне навантаження та в однофазному ввімкненні.

Постановка задачі. Однак існує досить велика група споживачів постійного струму. В цьому випадку асинхронний генератор (АГ) працює на випрямляч (В). У малих вітро- і гідроелектростанціях, в системах індивідуального опалення житла енергія АЕУ перетворюється на тепло і тому вид електроенергії – змінного чи постійного струму – неважливий. Відомо [2], що застосування випрямляча на виході генератора зменшує вартість необхідної батареї конденсаторів збудження, сприяє збільшенню жорсткості зовнішньої характеристики АГ.

Наразі в технічній літературі даному питанню приділено досить мало уваги. Тому задачею даної роботи є розробка математичної моделі системи «асинхронний генератор з конденсаторним збудженням – випрямляч – споживач постійного струму» (АГ–КБ–В–С) та дослідження специфіки фізичних явищ в таких комплексах.

Результати роботи. Математична модель АГ з ємнісним збудженням досить детально наведена в [3], тому в межах даної роботи розглядатися не буде.

Математична модель випрямляча (В). На даний час існує значна кількість методів моделювання схем з перетворювачами [4, 5]. При розробці моделі випрямляча використано метод перемикаючих функцій. Такий метод моделювання випрямляча обра-

но у зв'язку з уже попередньо розробленою математичною моделлю АГ–КБ, представленою в [3]. Наведена нижче математична модель випрямляча відноситься до шестипульсової мостової схеми (рис.1).

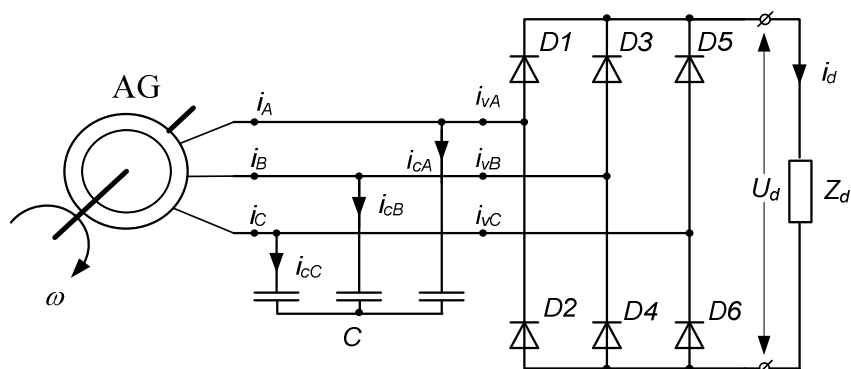


Рисунок 1 – Асинхронний генератор з некерованим мостовим випрямлячем

Протікання випрямленого струму i_d через діоди розраховується за допомогою перемикаючих функцій F_i . Передні фронти функцій F_1, \dots, F_6 співпадають з початком проміжків роботи пар вентилів $D_1 - D_6, \dots, D_5 - D_6$ відповідно, а задній фронт кожної з вказаних функцій співпадає з переднім фронтом наступної. Номери та діаграма роботи одночасно працюючих тиристорів наведено на рис.2. Більш детально спосіб визначення перемикаючих функцій представлено в [6].

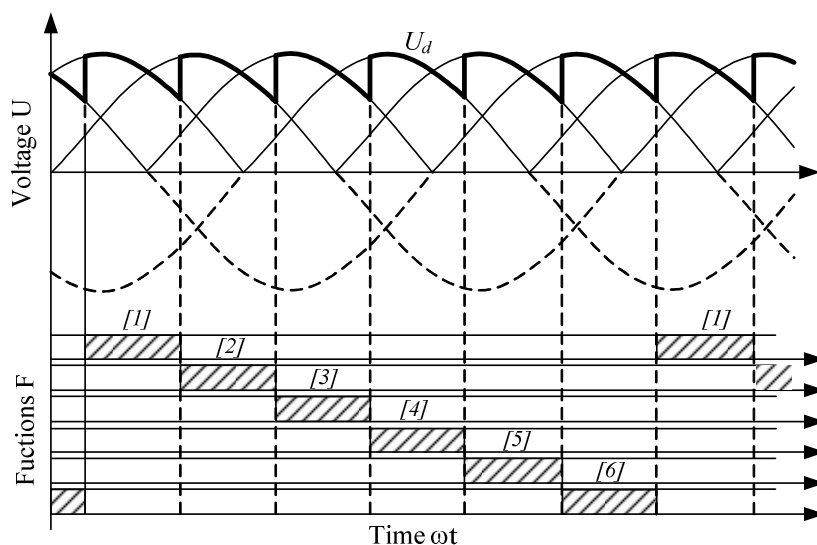


Рисунок 2 – Часові діаграми роботи випрямляча

Для наведеної схеми випрямляча амплітудні та середні значення напруги визначаються зі співвідношень

$$\begin{aligned}
 U_{dm} &= \sqrt{6} [U_{Ac}(F_1 - F_4) + U_{Bc}(F_3 - F_6) + U_{Cc}(F_5 - F_2)], \\
 U_d &= \frac{3\sqrt{6}}{\pi} [U_{Ac}(F_1 - F_4) + U_{Bc}(F_3 - F_6) + U_{Cc}(F_5 - F_2)].
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Середнє значення випрямленого струму

$$i_d = \sqrt{\frac{3}{2}} [i_{vA}(F_1 - F_4) + i_{vB}(F_3 - F_6) + i_{vC}(F_5 - F_2)]. \quad (2)$$

Математичні моделі споживачів постійного струму (С):

1 – зі статичним активно-індуктивним характером навантаження (RL).

Згідно з другим законом Кірхгофа миттєві значення фазної напруги на навантаженні матимуть вигляд:

$$L_d \frac{di_d}{dt} = U_d - i_d R_d, \quad (3)$$

де L_d – індуктивність навантаження, R_d – активний опір навантаження;

2 – з руховим характером навантаження – двигун постійного струму (ДПС)

Споживач описується системою диференціальних рівнянь виду

$$\begin{cases} U_d = L_\Sigma \frac{di_d}{dt} + \omega k \hat{O} + i_d R_\Sigma \\ J \frac{d\omega}{dt} = M_m - M_c \end{cases}, \quad (4)$$

де L_Σ, R_Σ – сумарні індуктивність і активний опір якрічного кола; k, \hat{O} – конструктивна стала двигуна і магнітний потік; J – момент інерції двигуна; $M_m = i_d k \hat{O}$ – момент двигуна.

Імітація різних типів споживачів здійснюється шляхом створення відповідного моменту опору на валу ДПС:

$$M_c = M_0 + (M_m - M_0) \left(\frac{\omega}{\omega_m} \right)^\alpha, \quad (5)$$

де α – коефіцієнт, що характеризує тип споживача на валу ДПС; $\dot{I}_0 \approx (0,05 - 0,1) \dot{I}_m$ – момент неробочого ходу ДПС.

Перехідні процеси підключення/відключення споживачів постійного струму аналізувалися за допомогою комп'ютерного моделювання. В якості генератора використовувалась асинхронна машина з коротким ротором загальнопромислового виконання типу АИР80А4СУ2: $P_{AG} = 1,2$ кВт; $n = 2740$ об/хв; $I_s = 2,93$ А; $R_s = 9,37$ Ом; $R_r = 5,13$ Ом; $X_s = 7,03$ Ом; $X_r = 6,5$ Ом. Ємність конденсаторів збудження $C = 50$ мкФ.

Системи електропостачання працюють на розгалужену мережу і в вузлі навантаження може бути декілька споживачів. Причому підключення їх до живлення частіш за все групове.

На рис.3-5 представлені динамічні характеристики асинхронного генератора та двох ДПС незалежного збудження з різними моментами опору: ДПС1 – моментом навантаження вентиляторного типу ($M_c = f(\omega^2)$), ДПС2 – з активним моментом навантаження ($M_c = M_m = const$). Потужність ДПС $P_{DCm} = 0,2$ кВ кожний.

Статична похибка за напругою АГ складає близько 33% від початкового значення, а динамічна – 68%. За рахунок коефіцієнта випрямляча $k = \frac{3\sqrt{6}}{\pi}$ статична похибка за напругою U_d на затискачах ДПС складе 9%. Пуск ДПС вважається вдалим, але в перехідному режимі генератор знаходиться на межі нижньої критичної частоти самозбудження. Це може призвести до втрати збудження АГ і можливості виникнення аварій-

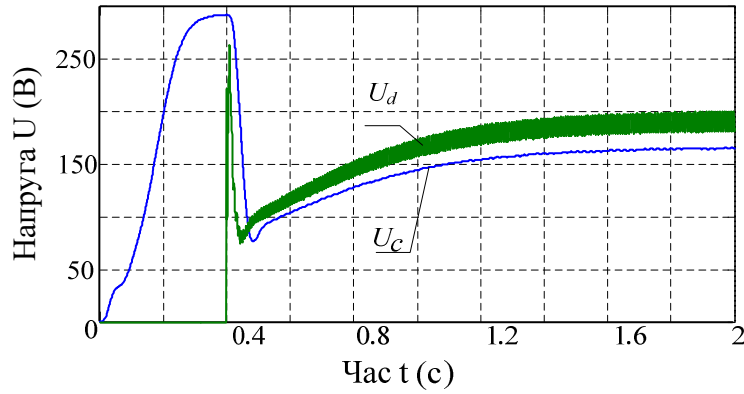


Рисунок 3 – Огинаюча напруги U_c генератора та випрямлена напруга U_d на затискачах ДПС

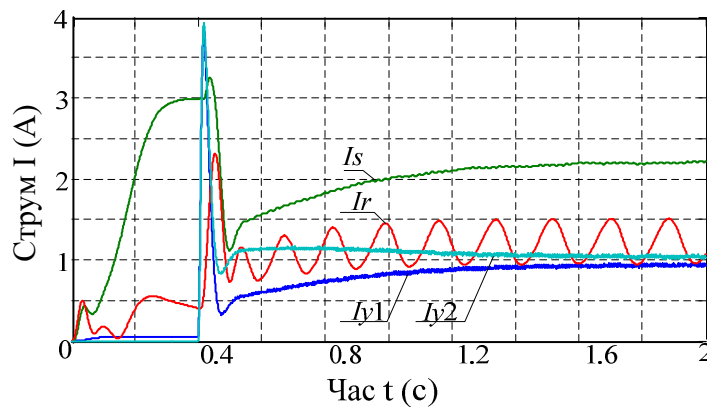


Рисунок 4 – Залежність огинаючих струмів ротора I_r та статора I_s АГ, якорних кіл ДПС1 I_{y1} та ДПС2 I_{y2}

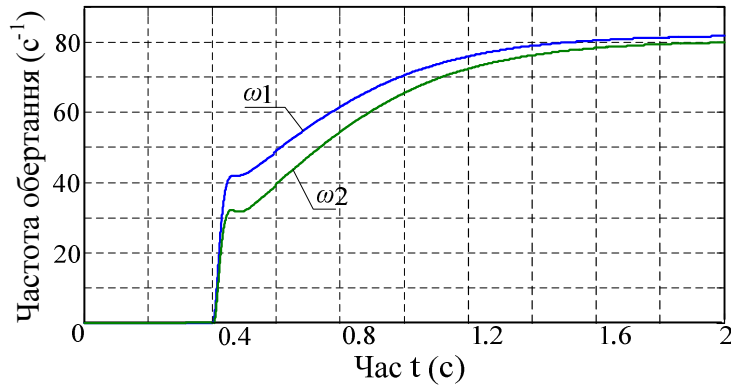


Рисунок 5 – Частоти обертання ДПС1 та ДПС2

ної ситуації.

Для виявлення перевантажувальної здатності АГ з ємнісним збудженням і живленням споживачів постійного струму були проведені відповідні дослідження – каскадне підключення ДПС різної потужності (рис.6).

Виявлено, що вдалий запуск можливий при дотриманні певного співвідношення потужностей джерела та споживача енергії:

$$\frac{P_{DCm}}{P_{AG}} \leq 0,35 \div 0,4. \quad (6)$$

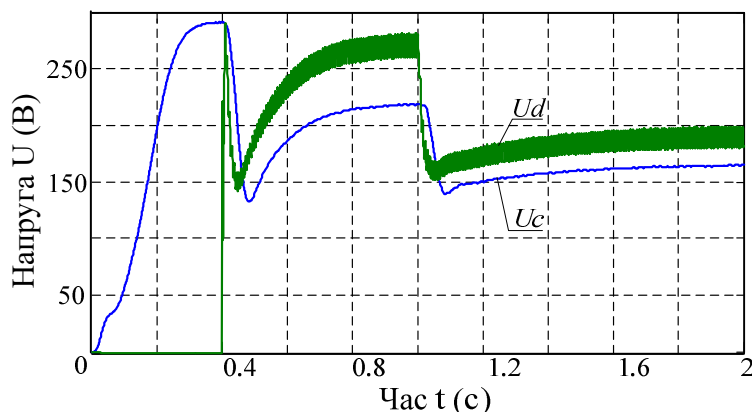


Рисунок 6 – Огинаюча напруги U_c генератора та випрямлена напруга U_d на затискачах ДПС

Співвідношення (6) на 10...15% більше, ніж відповідна залежність при підключенні одиночного асинхронного двигуна, наведена в [7].

Аналіз проведених досліджень дозволяє з'ясувати специфіку фізичних явищ в АГ з ємнісним збудженням та наявністю випрямляча. В асинхронному генераторі з конденсаторним збудженням струм конденсатора, що містить значну кількість вищих гармонійних складових, є одночасно струмом, що намагнічує генератор. Це викликає спотворення генерованої напруги. Вказане явище посилюється зі значним насиченням магнітопроводу генератора і призводить до того, що генерована напруга не є синусоїдальною. Комутація діодів відбувається раніше (піднятий наростаючий фронт та знижений спадаючий), ніж це мало б місце при синусоїдальній напрузі (рис.7).

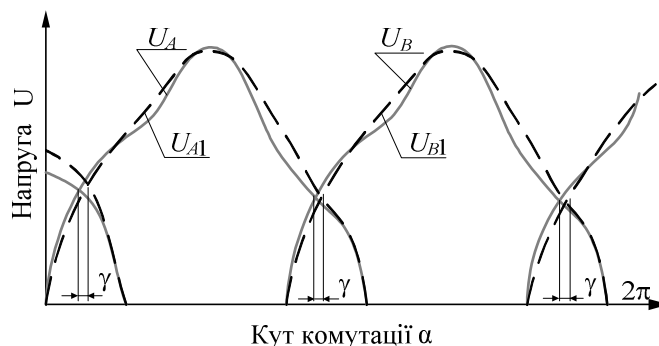
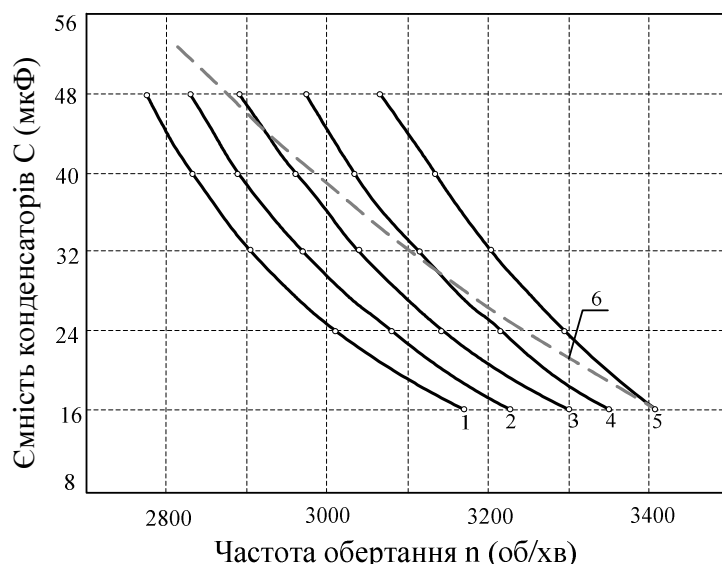


Рисунок 7 – Комутаційні процеси в системі АГ– некерований випрямляч

З метою підтвердження отриманих результатів і для перевірки адекватності розробленої математичної моделі проведено ряд експериментальних досліджень. Суть експерименту полягає в наступному. Значення напруги на виході установки підтримувалося на рівні $U_d = const = 500$ В. При цьому змінювалася частота обертання ротора генератора n і ємність конденсаторної батареї C . На рис.8 наведено сімейство кривих, кожна з яких відповідає певному значенню навантаження. В якості навантаження включалися лампи освітлення різної потужності (активний характер навантаження). Пунктиром показана крива, що відповідає номінальному струму статора $I_s = 2,93$ А. Тобто режими роботи АГ на характеристиках, розташованих вище цієї кривої, призводять до перевантаження генератора й не можуть бути тривалими.

Висновки. Виконані дослідження показали, що з точки зору статичної та динамічної стійкості АГ найбільш небезпечним є груповий пуск електрообладнання. Такий



1 – $P_d = 0$; 2 – $P_d = 0,25P_{nom}$; 3 – $P_d = 0,5P_{nom}$; 4 – $P_d = 0,75P_{nom}$; 5 – $P_d = P_{nom}$

Рисунок 8 – Криві залежностей для $U_d=500$ V, $C=var$, $n=var$

пуск розповсюджений в промисловості. Тому при проектуванні АЕУ на базі АГ вказані особливості необхідно враховувати при виборі пристроїв захисної автоматики.

Некерований випрямляч, підключений до затискачів АГ з конденсаторним збудженням, є для генератора активно-ємнісим навантаженням, що призводить до збільшення жорсткості його зовнішньої характеристики і перевантажувальної здатності. Так, прямий пуск ДПС з живленням від АГ можливий при дотриманні умови $\frac{P_{DCm}}{P_{AG}} \leq 0,35 \div 0,4$, що на 10...15% більше, ніж відповідна залежність при підключенні одиничного АД. Однак наявність випрямляча призводить до значних деформацій кривих напруг і струмів, що протікають в системі, внаслідок наявності широкого спектру вищих гармонійних складових.

З метою мінімізації техніко-економічних витрат на додаткову систему стабілізації напруги в складі АЕУ необхідно використовувати високообертові асинхронні машини спеціального виконання. При використанні в якості генератора асинхронної машини загальнопромислового застосування ($f = 50$ Гц, $n = 3000$ об/хв.) потужність споживача зі статичним характером навантаження не повинна перевищувати значення $P_d \leq 0,75P_{nom}$.

ЛІТЕРАТУРА

1. Вишне夫斯基 Л.В. Системы управления асинхронными генераторными комплексами / Л.В.Вишне夫斯基, А.Е.Пасс. – К.: Либідь, 1990. – 168с.
2. Гентковски З. Автономный асинхронный генератор с управляемым выходным выпрямителем / Гентковски З. // Труды науч.-техн. конф. с международным участием. – Крым, Алушта, 1995. – С.229-232.
3. Зачепа Ю.В. Математическая модель формируемого источника автономного питания на базе дизель-генератора / Зачепа Ю.В. // Електромеханічні та енергозберігаючі системи. – 2015. – Вып. 1/2015 (29). – С.26-37.
4. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники: учеб. пособие / Зиновьев Г.С. – Изд. 4-е, испр. и доп. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. – 672с.
5. Розанов Ю.К. Электронные устройства электромеханических систем: учеб. пособие /

- Ю.К.Розанов, Е.М.Соколова. – М.: Академия, 2004. – 272с.
6. Моделирование электромеханических систем: підруч. / [О.П.Чорний, А.В.Луговой, Д.Й.Родькін та ін.]. – Кременчук: КДПУ, 2001. – 376с.
7. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / под ред. Л.Г.Мамиконянца. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 528с.

Надійшла до редколегії 30.03.2015.

УДК 681.5.03

ВОЛЯНСКИЙ Р.С., к.т.н., доцент
САДОВОЙ А.В., д.т.н., профессор

Днепродзержинский государственный технический университет

РАЗРЫВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ИНТЕРВАЛЬНЫМ ЛИНЕЙНЫМ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМ ОБЪЕКТОМ

Введение. Ряд электромеханических систем в составе технологических процессов и промышленного оборудования характеризуется работой в условиях действия большого количества различных дестабилизирующих факторов, приводящих к изменению их координат и параметров. Этот факт не позволяет использовать большое количество известных методов синтеза систем управления электроприводами, базирующихся на точном знании параметров объекта управления [1]. Поэтому возникает задача синтеза систем управления динамическими объектами, функционирующих в условиях неопределенности.

Задача синтеза управляющего воздействия для линейных объектов с изменяющимися параметрами может быть решена путем использования интервального исчисления [2], которое позволяет оперировать не с точными значениями координат и параметров динамической системы, а с возможными интервалами их изменения. В настоящее время активно развивается управление объектами с неточно определенными параметрами [3], которое позволяет синтезировать модальные регуляторы для объектов с неопределенностью параметров.

С математической точки зрения использование при синтезе системы управления интервального исчисления позволяет перейти от рассмотрения конкретных траекторий движения в некотором фазовом пространстве к изучению областей этого фазового пространства, в которых определены траектории движения объекта, соответствующие всем возможным значениям сочетаний его параметров.

Исследование этих траекторий позволяет сформировать управляющее воздействие, обеспечивающее движение объекта управления по заданной траектории при изменении параметров в наперед заданных пределах, и определяет актуальность работы.

Постановка задачи. Целью настоящей работы является синтез релейной системы управления динамическим объектом 2-го порядка, параметры которого определены на некоторых интервалах.

Результаты работы. В качестве объекта управления (ОУ) рассмотрим электропривод постоянного тока с отрицательным вязким трением, питающийся от безынерционного преобразователя [4]. Уравнения динамики ОУ имеют вид

$$p\omega = \frac{h}{J}\omega + \frac{c}{J}I; \quad pI = -\frac{1}{T_a}I - \frac{c}{R_a T_a}\omega + \frac{k}{R_a T_a}U_y, \quad (1)$$