

Висновки. У статті викладено оригінальну методику синтезу закону частотного керування за критерієм мінімуму струму статора на основі полеорієнтованої моделі АМ. У загальному випадку в законі керування модуль вектора напруги живлення залежить не тільки від частоти, але і від моменту навантаження і магнітного потоку, що відображено в статті законами частотного керування (19) і (21). Аналіз динамічної моделі підтвердив практичну сталість абсолютного ковзання і адекватність моделі статички. При незмінних моменті навантаження і абсолютному ковзанні закон частотного керування (21) стає лінійним і є якісною апроксимацією закону (19), близького до лінійного.

ЛІТЕРАТУРА

1. Сандлер А.С., Сарбатов Р.С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями. М.: Энергия, 1974. 328с.
2. Булгаков А.А. Частотное управление асинхронными двигателями. М.: Энергоиздат, 1982. 216с.
3. Васильев Д.А., Пантелеева Л.А. Энергоэффективное управление асинхронным электродвигателем. *Вестник НГИЭИ*, 2019. № 4 (95). С.100-115.
4. Островляничик В.Ю., Поползин И.Ю. Исследование магнитной системы асинхронного двигателя при частотном управлении. *Вестник Кузбасского государственного технического университета*, 2016. №2. С.75-83.
5. Рудаков В.В., Столяров И.М., Дартау В.А. Асинхронные электроприводы с векторным управлением. Л.: Энергоатомиздат, 1987. 135с.
6. Слежановский О.В., Дацковский Л.Х. и др. Системы подчинённого регулирования электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями. М.: Энергоатомиздат, 1983. 255с.
7. Ключев О.В., Садовой А.В. Энергетические характеристики асинхронного электропривода с двухканальной системой управления. *Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету*. Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2011. Вип. 2(17). С.174-181.
8. Ключев О.В., Садовой О.В., Сохіна Ю.В. Системи керування асинхронними вентильними каскадами. Кам'янське: ДДТУ, 2018. 294с.

Надійшла до редколегії 03.02.2020.

УДК 62-83

DOI 10.31319/2519-2884.36.2020.11

ДЕРЕЦ А.Л., к.т.н., доцент
САДОВОЙ А.В., д.т.н., професор
ДЕРЕЦ А.А., студентка

Днепропетровский государственный технический университет, г. Каменское

ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РЕЛЕЙНО-МОДАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТРЕТЬЕГО ПОРЯДКА С ЦЕЛЬЮ ПОИСКА ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ НАСТРОЕК РЕГУЛЯТОРОВ

Введение. Ограничение промежуточных координат в переходных процессах является типовым требованием [1] при проектировании систем автоматического управления. Такой характер динамики наиболее эффективно реализуется релейной системой [2] подчинённого регулирования, синтезированной методом N-і переключений [3]. Распределение корней релейно-модальных систем [4] на основе данного метода обес-

печивает близость их переходных траекторий к оптимальным по быстродействию [5], [6]. Синтезированные подобным способом регуляторы формально не обладают предельным быстродействием [6]. Вместе с тем, имеющиеся в математическом аппарате метода N-i переключений средства целенаправленного влияния на динамические характеристики систем открывают возможности коррекции параметров [7] в направлении достижения экстремальных показателей длительности регулирования.

Постановка задачи. Согласно методу N-i переключений [3] для оптимального управления динамическим объектом третьего порядка

$$\left. \begin{aligned} p\varphi &= \omega \\ p\omega &= \varepsilon \\ p\varepsilon &= a \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

применяется каскад релейных регуляторов

$$\left. \begin{aligned} u_{R1} = u_{R\varphi} = \omega^* &= \omega_{\max} \cdot \text{sign}(\varphi^* - \varphi - K_{\varphi\omega} \cdot \omega - K_{\varphi\varepsilon} \cdot \varepsilon) \\ u_{R2} = u_{R\omega} = \varepsilon^* &= \varepsilon_{\max} \cdot \text{sign}(\omega^* - \omega - K_{\omega\varepsilon} \cdot \varepsilon) \\ u_{R3} = u_{R\varepsilon} = a^* &= a_{\max} \cdot \text{sign}(\varepsilon^* - \varepsilon) \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

где $p = d/dt$ – символ дифференцирования по времени, $\varphi, \omega, \varepsilon, a$ – координаты состояния, символы которых соответствуют обозначениям координат позиционного электропривода, принятым в работах [3], [5-7], $\omega_{\max}, \varepsilon_{\max}, a_{\max}$ – уровни ограничения координат; K – коэффициенты обратных связей, символом * отмечены заданные значения соответствующих переменных.

Двойственная индексация регуляторов $R_1 = R\varphi, R_2 = R\omega, R_3 = R\varepsilon$ указывает на их положение в иерархии каскада (2) или на регулируемую величину в зависимости от контекста. В такой системе выходная величина регулятора $R\varphi$ является задающим воздействием для контура регулирования ω . В свою очередь, выходной сигнал $R\omega$ имеет смысл заданного значения координаты ε . На выходе $R\varepsilon$ формируется управляющее воздействие, прикладываемое к объекту управления (1).

Метод N-i переключений основан на прогнозе оптимальной по быстродействию переходной траектории с учётом уровней ограничения канонических координат и синтезе параметров каскада (2), обеспечивающих переключения регуляторов в характерных точках такой траектории. Оптимизация системы управления по быстродействию [3] обеспечивается коэффициентами обратных связей регуляторов каскада (2) вида

$$K_{\omega\varepsilon} = \frac{1}{2}T_a, \quad K_{\varphi\omega} = \frac{1}{2}(T_a + T_\varepsilon), \quad K_{\varphi\varepsilon} = \frac{1}{4}T_aT_\varepsilon + \frac{1}{12}T_a^2, \quad (3)$$

где постоянные времени замкнутой системы определяются как

$$T_a = \frac{\varepsilon_{\max}}{a_{\max}}, \quad T_\varepsilon = \frac{\omega_{\max}}{\varepsilon_{\max}}, \quad T_\omega = \frac{\varphi_{\max}}{\omega_{\max}}. \quad (4)$$

Уравнение скольжения регулятора $R\varphi$ каскада (2)

$$1 + K_{\varphi\omega} \cdot p + K_{\varphi\varepsilon} \cdot p^2 = 0 \quad (5)$$

может иметь как действительные, так и комплексно-сопряженные корни в зависимости от соотношения величин $\omega_{\max}, \varepsilon_{\max}, a_{\max}$. При комплексно-сопряженных корнях движение системы в области малых отклонений становится колебательным, что при-

водит к появлению перерегулирования и росту длительности компенсации ударных возмущений [3], [6]. Подобный характер переходных процессов нежелателен для большинства технических систем. Метод N-і переключений позволяет задать требуемую форму переходных траекторий во всём диапазоне изменения регулируемой величины заменой оптимальных настроек (3) регуляторов каскада (2) модальными [5]

$$K_{\omega\varepsilon} = \frac{1}{2}\gamma T_a, \quad K_{\varphi\omega} = \frac{1}{2}\gamma(T_a + T_\varepsilon), \quad K_{\varphi\varepsilon} = \frac{1}{4}\gamma^2 T_a T_\varepsilon, \quad (6)$$

где постоянные времени корректируются повышающим коэффициентом

$$\gamma = \sqrt{\frac{T_a T_\varepsilon + \frac{1}{3}T_a^2}{T_a T_\varepsilon}}. \quad (7)$$

Близость значений параметров регуляторов (2) при модальных и оптимальных настройках обеспечивает подобие переходных процессов релейно-модальной и оптимальной по быстродействию систем, причём корни уравнения скольжения регулятора R_φ являются чисто действительными [5], что гарантирует аperiodический характер заключительной стадии динамических режимов. Однако, данная мера создаёт дотяжку, увеличивая длительность переходного процесса [6]. Как было установлено ранее для каскада регуляторов (2), варьирование расчётного рывка при определении коэффициентов обратных связей (3) методом N-і переключений позволяет опытным путём выполнить коррекцию параметров системы, что обеспечивает близкое к максимальному быстродействию [7]. Задачей настоящего исследования является установление возможности коррекции настроек релейных регуляторов (2) в направлении оптимального бы-

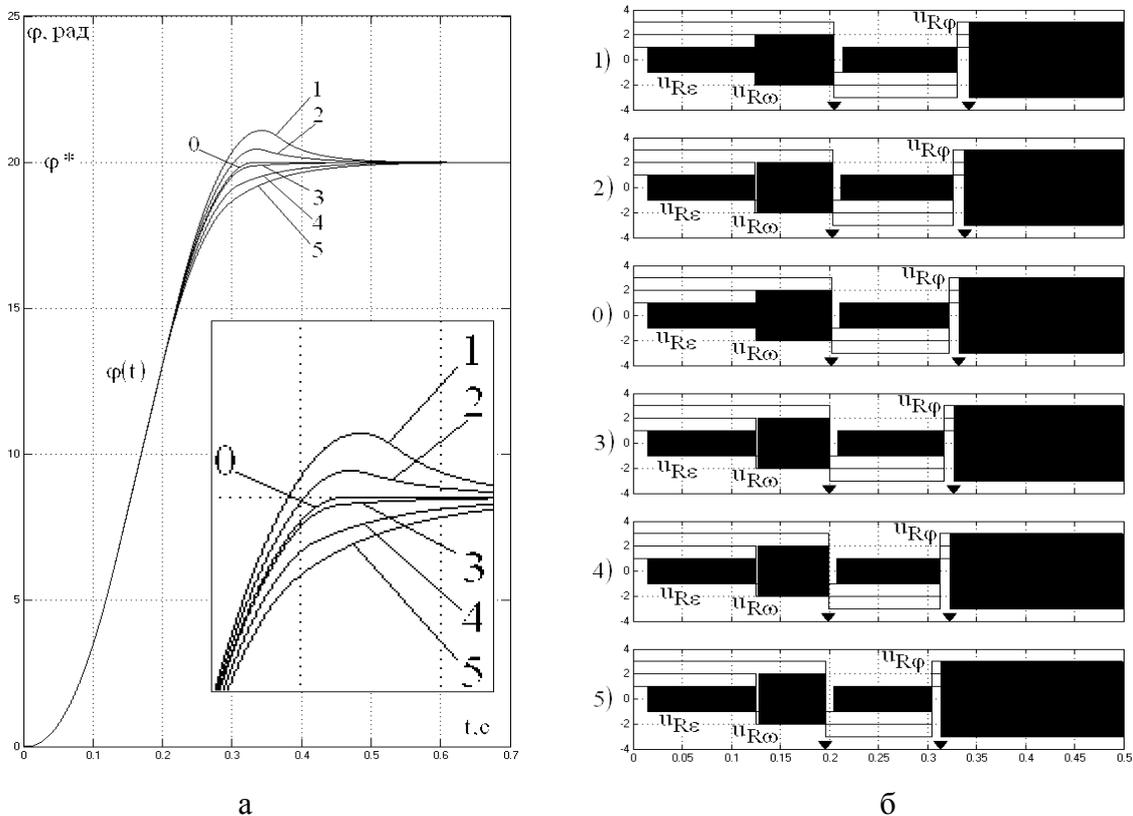


Рисунок 1 – Семейство переходных кривых релейно-модальной системы управления (а) и смещение моментов переключения каскада регуляторов (б)

стродействия при сохранении преимуществ настройки методом распределения корней.

Результаты работы. Рассмотрим систему управления со следующими уровнями ограничений координат состояния:

$$\omega_{\max} = 100\text{c}^{-1}, \varepsilon_{\max} = 800\text{c}^{-2}, a_{\max} = 57200\text{c}^{-3}. \quad (8)$$

Эти числовые данные позволят сопоставить переходные характеристики оптимизируемой системы с результатами работ [5-7].

В данном исследовании выполнена серия экспериментов с моделью релейно-модальной системы управления, при синтезе которой варьировалась расчётная амплитуда управляющего воздействия a_{\max} по отношению к реальной $a_{\max 0}$ так, чтобы ко-

эффициент расчётной амплитуды управления $K_U = \frac{a_{\max}}{a_{\max 0}}$ изменялся в диапазоне

0,6...1,4 с шагом 0,2. В результате получено семейство переходных характеристик, представленных на рис.1, а, где цифрами обозначены кривые, полученные при следующих условиях: 0 – оптимальные регуляторы с коэффициентами вида (4), 1-5 – релейно-модальные регуляторы с коэффициентами вида (6) при 1 – $K_U = 0,6$, 2 – $K_U = 0,8$, 3 – $K_U = 1,0$, 4 – $K_U = 1,2$, 5 – $K_U = 1,4$.

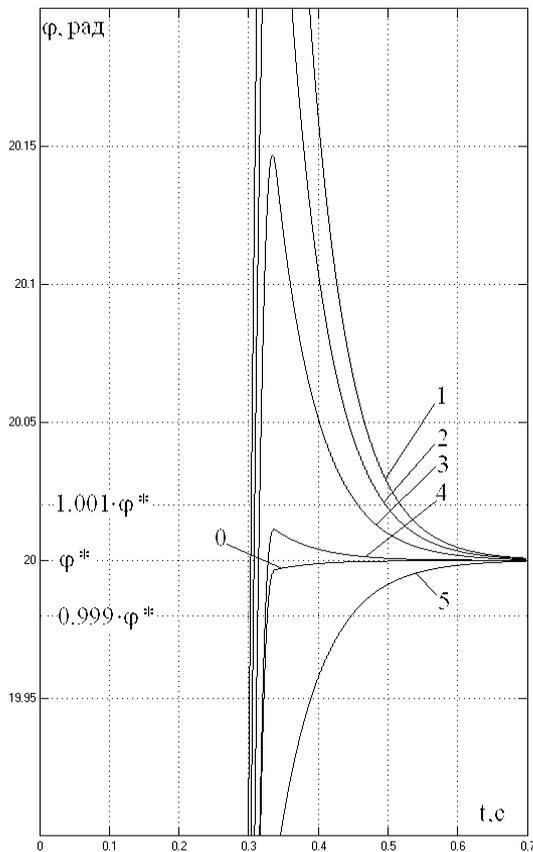


Рисунок 2 – Семейство переходных кривых релейно-модальной системы управле-

Расхождение диаграмм на заключительной стадии переходного процесса легко объяснить, рассмотрев сигналы каскада регуляторов (рис.1, б) системы управления. Последовательное изменение настроек системы в соответствии с варьируемым коэффициентом приводит к смещению начала скольжения регулятора R_φ на более ранние моменты времени. Это сперва снижает перерегулирование, а затем придаёт процессу всё более явный аperiodический характер. Необходимо особо подчеркнуть, что отличия в характере переходных процессов исследуемых систем формируются до возникновения скользящего режима регулятора R_φ и всецело определяются смещением моментов его единичных переключений, поскольку применённый метод синтеза гарантирует чисто действительные корни уравнения скольжения (5).

Результаты моделирования, демонстрирующие переход от перерегулирования к дотяжке (рис.1), указывают на существование процесса с минимальной длительностью. На основании перебора коэффициента расчётной амплитуды управления в диапазоне 0,8...1,0 с шагом 0,05 (рис.2) получена зависимость $t_{\text{пер}}$ от K_U (рис.3), имеющая оче-

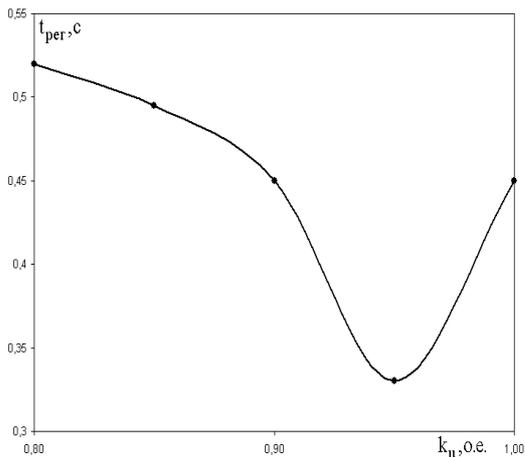


Рисунок 3 – Предварительная зависимость длительности регулирования от коэффициента расчётной амплитуды сигнала управления

видный экстремум. В качестве критерия завершения переходного процесса принято достижение отклонения регулируемой координаты от заданного значения не более чем на $\pm 0,001 \cdot \varphi^*$. На рис.2 цифрами обозначены кривые, полученные при следующих условиях: 0 – оптимальные регуляторы с коэффициентами вида (4), 1-5 – релейно-модальные регуляторы с коэффициентами вида (6) при 1 – $K_U = 0,8$, 2 – $K_U = 0,85$, 3 – $K_U = 0,9$, 4 – $K_U = 0,95$, 5 – $K_U = 1,0$.

Уточнить результаты эксперимента, представленные на рис.3, позволяет построение дополнительного семейства диаграмм (рис.4, а). Полученная зависимость $t_{\text{пер}}$ от K_U (рис.4, б) имеет более

выраженный экстремум. На рис.4 цифрами обозначены кривые, полученные при следующих условиях: 0 – оптимальные регуляторы с коэффициентами вида (4), 1-5 – релейно-модальные регуляторы с коэффициентами вида (6) при 6 – $K_U = 0,93$, 7 – $K_U = 0,94$, 8 – $K_U = 0,96$, 9 – $K_U = 0,97$, 5 – $K_U = 1,0$.

Необходимо отметить, что ветвь графика, находящаяся слева от экстремума, соответствует настройкам системы управления, вызывающим перерегулирование. Следовательно, при коррекции параметров регуляторов с помощью коэффициента расчётной амплитуды управления нецелесообразно добиваться настройки на предельно-апериодический процесс. Для повышения запаса устойчивости следует выбирать значение K_U не в самой точке экстремума, а при приближении к ней справа. Отсутствие необходимости поиска строгого экстремума позволяет обойтись без чрезмерной детализации эмпирического графика. Так, в рассмотренном примере выбор значения $K_U =$

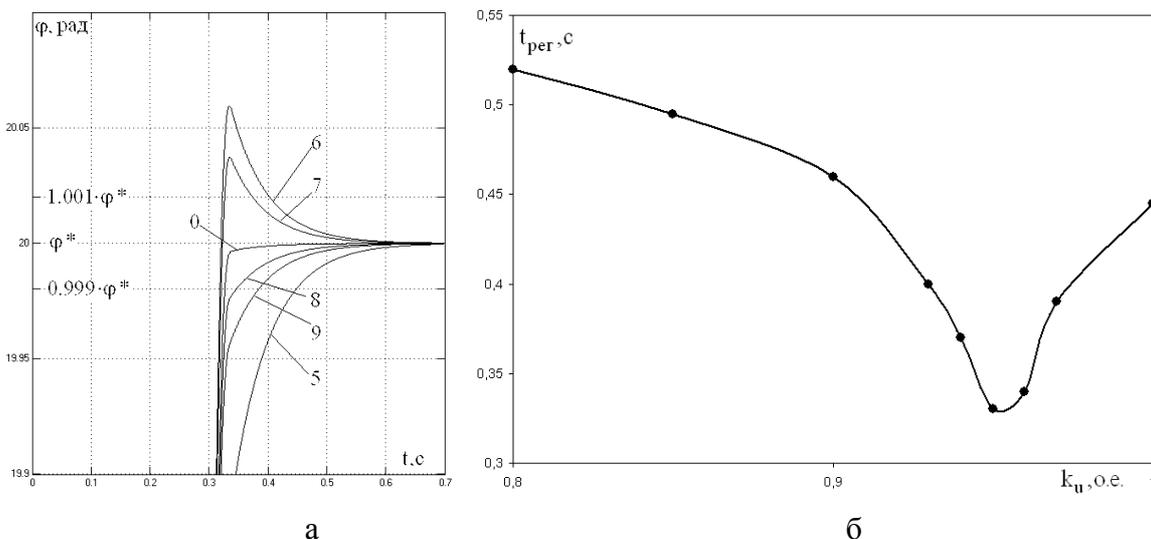


Рисунок 4 – Семейства переходных кривых (а) и уточнённая зависимость длительности регулирования от коэффициента расчётной амплитуды сигнала управления (б)

0,96 можно обосновать как с помощью рис.4, б, так и рис.3, то есть уточнение формы кривой практически не влияет на результат.

На рис.5, а представлены временные диаграммы переходного процесса релейно-модальной системы с настройками, синтезированными при $K_U = 0,96$, что соответствует ближайшей правой от экстремума расчётной точке на рис.4, б. Длительность ре-

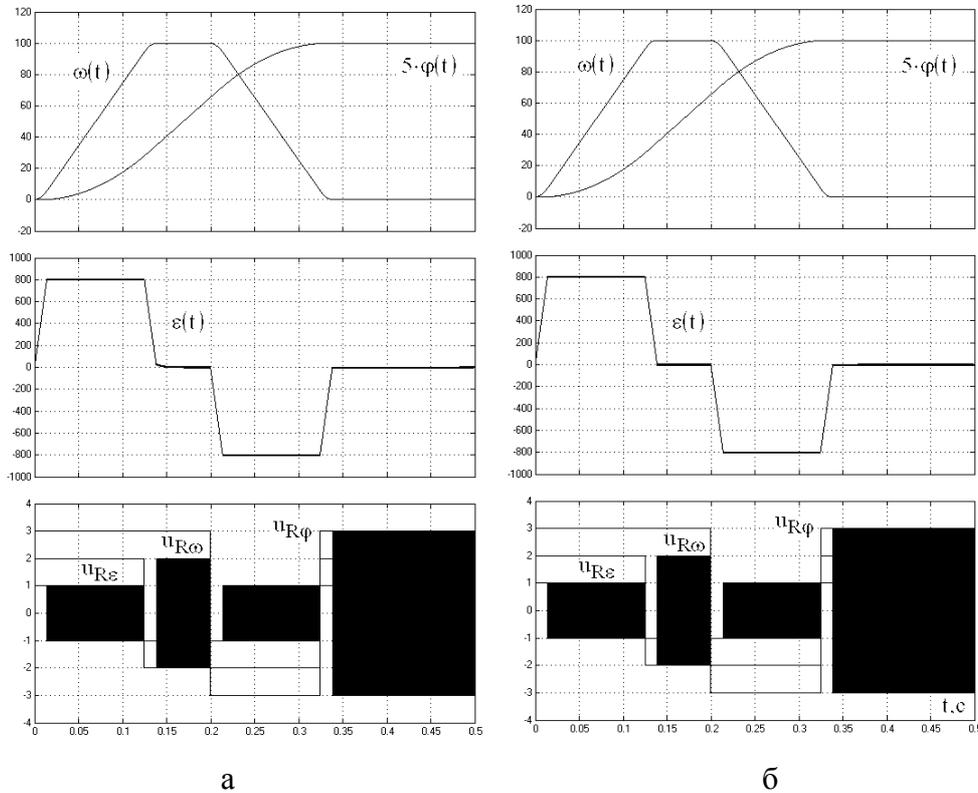


Рисунок 5 – Динамика скорректированной модальной (а) и оптимальной (б) систем

гулирования приближается к достигаемой в «идеальной» системе оптимального управления нейтрально-устойчивым объектом, диаграммы которой представлены рядом (рис.5, б) для сравнения.

Выводы. Применение предлагаемого способа коррекции настроек позволяет компенсировать отклонения системы управления от оптимальной по быстродействию траектории, обусловленные заменой её оптимальных настроек релейно-модальными. Данный результат получен путём применения к релейно-модальным системам методики коррекции быстродействия, ранее разработанной в контексте метода N-i переключений для систем с оптимальными регуляторами. Методика сводится к построению семейства переходных характеристик при варьировании расчётной амплитуды управляющего воздействия и последующему применению определяемого эмпирически поправочного коэффициента при синтезе коэффициентов обратных связей. Эмпирическая зависимость $t_{пер}$ от K_U не требует трудоёмкой детализации. Дальнейшее развитие данной методики целесообразно в направлениях её адаптации к случаям различных форм траектории [8] и более высокого порядка систем управления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ключев В.И. Ограничение динамических нагрузок электропривода. М.: Энергия, 1971. 320с.

2. . Фельдбаум А.А. Основы теории оптимальных автоматических систем. М.: Наука, 1966. 624с.
3. Садовой О.В., Дерезь О.Л. Спеціальні питання математичного опису і моделювання динаміки складних систем. Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2014. 206с.
4. Горелов П.В., Мотченко А.И., Морозов Д.И. Релейно-модальное управление двух-массовыми электромеханическими системами. *Вестник НТУ ХПИ: «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика»*. Харьков, 2008. №30. С.120-123.
5. Дерезь А.Л., Садовой А.В. Синтез каскадно-подчинённых структур релейно-модальных систем с распределением корней на основе метода N-і переключений. *Вестник НТУ «ХПИ». Сер.: «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика»*. Харьков, 2017. №27. С.75-79.
6. Дерезь А.Л., Садовой А.В., Сохина Ю.В. Сравнительное исследование релейных систем третьего порядка с оптимальными и модальными регуляторами, синтезированными методом N-і переключений. *Сборник научных трудов ДГТУ (технические науки)*. Каменское, 2018. Вип. 1(32). С.59-63.
7. Дерезь А.Л., Садовой А.В. Коррекция параметров квазиоптимальных по быстродействию релейных систем третьего порядка, синтезированных методом N-і переключений. *Вісник НТУ «ХПИ». Серія: «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія та практика»*. Х.: НТУ «ХП», 2019. № 9 (1334). С.20-23.
8. Дерезь А.Л., Садовой А.В., Дерезь А.А. Моделирование режимов позиционирования оптимизированной по быстродействию релейной системы управления при изменении расчётной амплитуды напряжения. *Сборник научных трудов ДГТУ (технические науки)*. Каменское, 2019. Вип. 2(35). С.55-59.

Поступила в редколлегию 11.03.2020.

УДК 621.313.322

DOI 10.31319/2519-2884.36.2020.12

НІЗІМОВ В.Б., д.т.н., професор
КЛЮЄВ О.В., к.т.н., доцент

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

ВПЛИВ ВУЗЛІВ ПРИМУСОВОЇ ЄМНІСНОЇ КОМУТАЦІЇ НА ГАРМОНІЙНИЙ СКЛАД НАПРУГИ ЗБУДЖЕННЯ НЕСИМЕТРИЧНИХ МОСТОВИХ ЗБУДЖУВАЧІВ СИНХРОННИХ ГЕНЕРАТОРІВ

Вступ. Основним режимом роботи синхронних генераторів (СГ) автономних генеруючих установок (АГУ) є режим, близький до номінального. Однак, при підключенні до АГУ споживачів співставної потужності для стабілізації вихідної напруги генератора застосовують релейне або параметричне форсування напруги збудження впливом на кути керування тиристорами збуджувача. Оскільки коефіцієнт форсування за напругою лежить в межах 3...5 відносних одиниць в залежності від потужності СГ, це веде до значних кутів керування тиристорами збуджувача в номінальному режимі та викликає споживання збуджувачем значної реактивної потужності і зниження енергетичних показників. Для підвищення енергетичних показників мостових збуджувачів, особливо несиметричних, застосовують конденсатори в силових колах збуджувального