

Днепропетровский государственный технический университет

**ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ  
ПРИВОДА ОТВЕТСТВЕННЫХ МЕХАНИЗМОВ**

**Введение.** Автоматическое регулирование тока возбуждения (АРВ) должно обеспечивать устойчивую работу синхронных двигателей (СД) при заданных режимах работы, а также способствовать поддержанию номинального напряжения в узле электрической нагрузки при допустимом тепловом режиме двигателей. Для повышения устойчивости работы синхронных двигателей и увеличения отдаваемой в сеть реактивной мощности при кратковременных понижениях напряжения или при увеличении нагрузки во всех случаях должна использоваться параметрическая или релейная форсировка возбуждения [1]. Однако при работе мощных тиристорных электроприводов прокатных станов и других электроприемников с резкопеременной нагрузкой перетоки реактивной мощности, вызывающие потери электроэнергии и колебания напряжения в сетях, как правило, не могут быть эффективно скомпенсированы синхронными двигателями, оснащенными серийными тиристорными возбудителями с кратностью форсировки напряжения, регламентируемой ГОСТ 24688-81. Кроме того, свободные колебания ротора крупных СД при ударной нагрузке вызывают дополнительные потери энергии в двигателе и неблагоприятно отражаются на смежных электроприемниках. Поэтому демпфирование колебаний СД применением автоматического регулирования возбуждения является средством улучшения эксплуатационных и энергетических показателей узла нагрузки. Однако в ряде случаев из-за инерционности самого контура возбуждения СД современные устройства АРВ оказываются недостаточно эффективными. Ограниченные возможности существующих тиристорных возбудителей и устройств АРВ можно существенно расширить. Наиболее эффективным способом решения указанной задачи является форсировка возбуждения с емкостной компенсацией инерционности контура возбуждения путем разряда предварительно заряженного емкостного накопителя энергии в этом контуре с одновременной подачей форсировочного напряжения от тиристорного преобразователя. Интенсивное развозбуждение синхронного двигателя производится за счет включения в контур возбуждения емкостного элемента. При этом управление возбуждением СД достигается изменением структуры силового преобразователя, который обеспечивает релейное управление в области больших возмущений. В области малых нагрузок реализуется управление устройствами АРВ.

**Постановка задачи.** Задачей этой статьи является установление алгоритма управления контуром возбуждения СД с одновременным повышением быстродействия режимов форсировки тока возбуждения и развозбуждения для ввода автоматического повторного включения (АПВ) или автоматического ввода резерва (АВР).

**Результаты работы.** Синхронные двигатели ответственных механизмов должны обеспечивать их устойчивую работу и самозапуск по условиям технологического процесса или по условиям безопасности (насосные агрегаты охлаждения фурм доменных печей, турбодвигатели компрессоров по производству карбамида, механизмы взрывоопасных производств).

Для повышения устойчивости работы СД применяется форсировка напряжения возбуждения в случае перегрузки или при понижении напряжения, причем время ввода защиты минимального напряжения должно выбираться в пределах от 0,5 до 1,5 с, а уставка по напряжению – не выше 70% номинального напряжения питания (ПУЭ, п.5.3.52). Кроме того, для обеспечения режима самозапуска СД для ускорения ввода в действие устройства АВР или АПВ необходимо производить гашение поля.

При работе СД статическая устойчивость определяется прежде всего характером изменения электромагнитного момента двигателя в функции угла нагрузки  $M=f(\theta)$ .

Рассмотрим аналитическое выражение угловой характеристики СД в относительных единицах

$$M_c = \frac{E_q U}{X_d} \sin\theta + \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right) \frac{U^2}{2} \sin 2\theta, \quad (1)$$

где  $E_q$  – э.д.с. обмотки возбуждения (ОВ);  $U$  – напряжение сети;  $X_d, X_q$  – индуктивные сопротивления по продольной и поперечной осям соответственно;  $\theta$  – угол нагрузки.

При изменении режима работы СД, нарушающего равновесие вращающегося и тормозного моментов, появляется избыточный момент, который стремится возвратить ротор в исходное положение. Таким образом, положительный знак производной момента по углу нагрузки является первым критерием устойчивости статического режима работы СД.

Применительно к неявнополюсному СД этот критерий имеет вид

$$\frac{dM}{d\theta} = \frac{E_q U}{X_d} \cos\theta > 0. \quad (2)$$

В пределах  $-\frac{\pi}{2} < \theta < \frac{\pi}{2}$  работа СД будет устойчивой. Если угол  $\theta \geq \frac{\pi}{2}$  и  $\cos\theta \leq 0$ , работа СД будет неустойчивой.

Для явнополюсных синхронных двигателей вследствие наличия параметрического момента критический угол  $\theta_{кр}$  меньше  $\frac{\pi}{2}$  и зависит от соотношения параметров  $X_d$  и  $X_q$ , а также от значений величин  $E_d$  и  $U$ .

Принимая параметры СД равными  $\frac{X_q}{X_d} = 0,6$ ,  $E_q = 2$ ,  $U = 1$ , определим критический угол нагрузки явнополюсного СД [2]:

$$\left(\frac{dM}{d\theta}\right)_{\theta=\theta_{кр}} = \frac{E_q U}{X_d} \cos\theta_{кр} + U^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right) \cos 2\theta = 0. \quad (3)$$

После подстановки значений параметров в (3) получим  $\cos\theta_{кр} = 0,285$ , откуда  $\theta_{кр} = 74^\circ$ .

При  $\theta = \theta_{кр}$  обеспечивается предел статической устойчивости или величина максимального момента вращения

$$M_{\max} = \frac{E_q U}{X_d} \sin\theta_{кр} + \frac{U^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right) \sin 2\theta_{кр}. \quad (4)$$

Таким образом, при отклонении от установившегося режима работы поведение СД будет определяться производной момента по углу нагрузки.

Поэтому управление контуром возбуждения должно вестись следующим образом: при понижении напряжения  $< 0,8 U_n$  или возрастании  $M_c > 1$  о.е., а также при одновременном понижении напряжения и приложении значительной нагрузки на вал двигателя при  $dM/d\theta > 0$  необходимо производить форсировку напряжения возбуждения, в противном случае, при  $dM/d\theta < 0$  обеспечить режим гашения поля СД.

Один из возможных вариантов устройства возбуждения СД, обеспечивающего режимы форсировки тока и гашения поля, приведен на рис.1. При синхронном ходе двигателя ток в контуре возбуждения определяется начальной уставкой возбудителя UL и

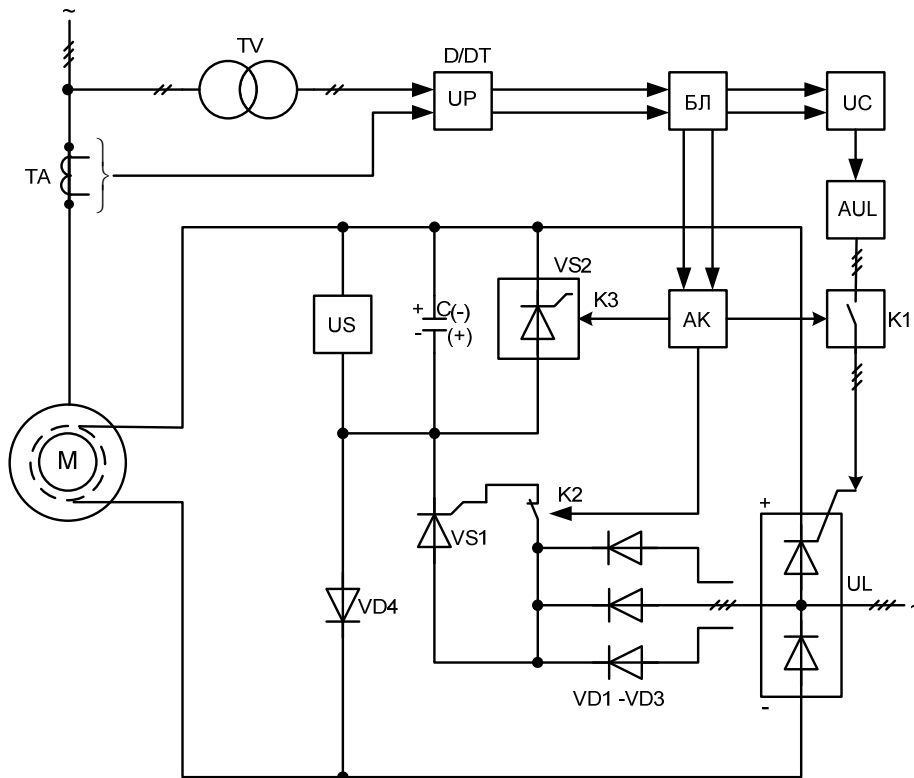


Рисунок 1 – Принципиальная схема устройства управления контуром возбуждения синхронного двигателя

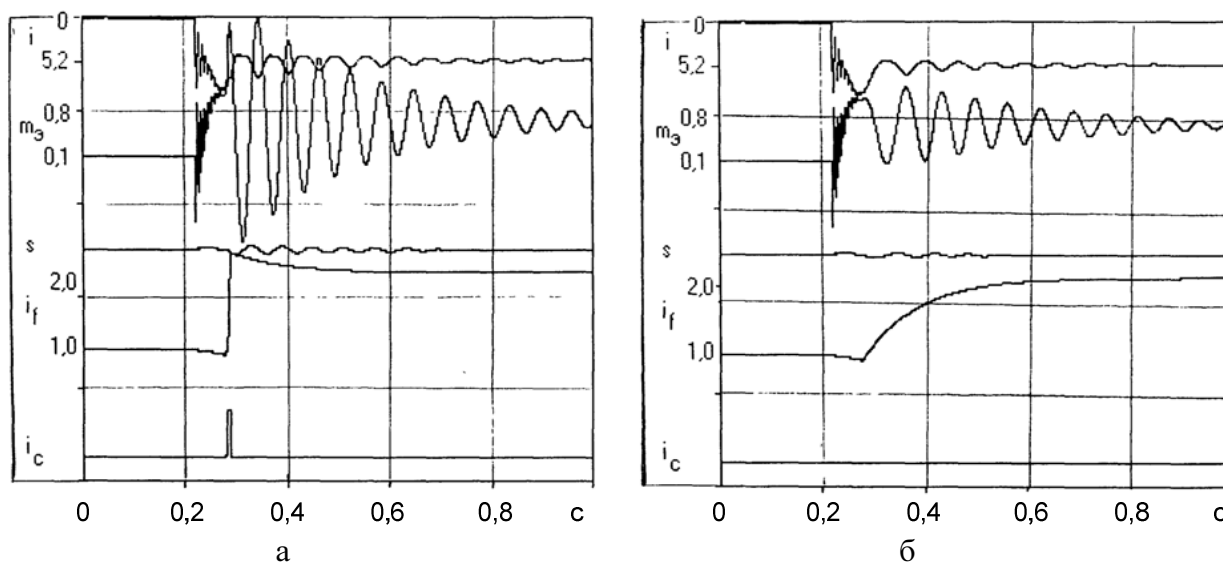
блоком АРВ УС. Конденсатор НЭ заряжен от источника зарядного напряжения US напряжением необходимой полярности. Кроме того, НЭ получает подзаряд от возбuditеля UL через диод VD4. На блок логики БЛ поступает сигнал от производной мощности по углу нагрузки UP, который в относительных единицах пропорционален производной момента по углу нагрузки. Основной функцией блока логики является определение знака производной момента по углу нагрузки и состояние тиристора VS2, который определяет режим управления контуром возбуждения: при включенном VS2 – режим форсировки, при выключенном VS2 – режим гашения поля. В момент ударного приложения нагрузки или значительного снижения напряжения в питающей электросети по сигналам датчиков тока ТА и напряжения TV срабатывают пороговые элементы, входящие в блок управления форсировкой и развозбуждением АК, который ключами К1 снимает импульсы управления с катодной группы тиристоров возбuditеля, а ключом К2 включает коммутирующий тиристор VS1. При включении тиристора VS1 встречным током НЭ выключается катодная группа тиристоров UL, а обмотка возбуждения переключается на форсировочное напряжение возбuditеля по следующей цепи: ОБ СД – вентили анодной группы UL – разделительные диоды VD1-VD3 – коммутирующий тиристор VS1 – конденсатор С – ОБ СД. Одновременно происходит разряд НЭ в контуре возбуждения. Ток в ОБ возрастает до форсировочного значения. Параллельно система АРВ УС вырабатывает корректирующий сигнал в функции измеренных тока и напряжения СД и через систему вертикального управления АUL устанавливает требуемый угол управления возбuditелем. При достижении напряжением на перезаряжающемся конденсаторе С заданного значения, устанавливаемого блоком АК, в зависимости от знака производной момента по углу нагрузки ( $dM/d\theta > 0$ ) включается тиристор VS2, что приводит к шунтированию конденсатора С НЭ. На катодную группу тиристо-

ров UL подаються управляючі імпульси від АУЛ при замиканні ключа КІ, і в ОВ устатковується ток, значення якого визначається пристроєм АРВ УС.

Для інтенсивного розвозбудження СД при  $dM/d\theta < 0$  блок АК не включає тиристор VS2 і в контур возбудження вводиться НЭ, що веде до зниженню току в ОВ.

Перезаряджений конденсатор С НЭ позитивним потенціалом вимикає тиристор VS1 і розряджається на ОВ через діод VD4 по ланці: перезаряджений конденсатор (+) С – діод VD4 – ОВ СД – конденсатор (-) С, що призводить до зміненню напрямку току возбудження. При зниженні е.д.с. статора до допустимого рівня подається сигнал на ввід АПВ або АРВ.

Для порівняльної оцінки швидкодії режимів форсування возбудження отримані розрахункові залежності для СД типу МСА 72/4 з параметрами  $P_H=12$  кВт,  $U_H=380$  В,  $n_H=1500$  об/мін (рис.2).



а – с НЭ в ОВ; б – без НЭ в ОВ

Рисунок 2 – Розрахункові залежності режиму форсування возбудження СД при набросі навантаження  $M_c=0,8$  о.е. і посадке напруги в мережі до  $0,8 U_H$

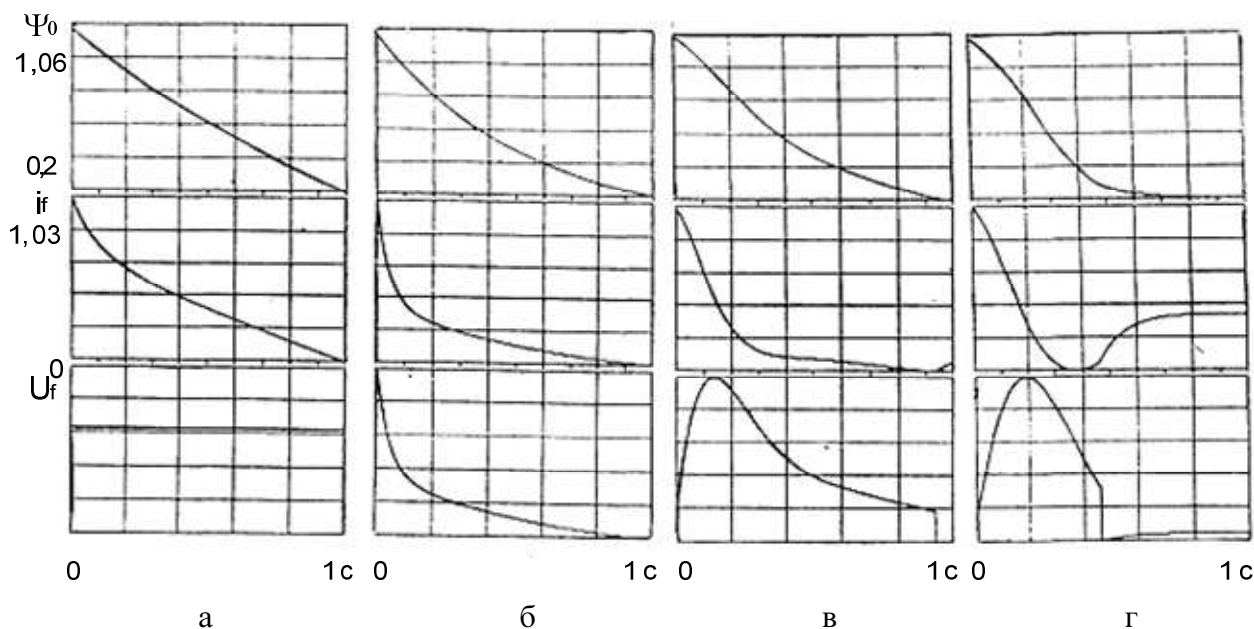
Аналіз розрахункових залежностей показує, що швидкодії режиму форсування току возбудження в компенсованому контурі на порядок вище, ніж в серійних тиристорних возбудителях.

Для порівняльної оцінки різних пристроїв возбудження отримані розрахункові залежності режиму гашення поля СД при наступних даних: момент статического опору  $m = 0,1$  о.е.;  $K_p = 10$ ;  $K_u = 1,7$ ;  $C = 250$  мкФ;  $R_{CH} = 10 \cdot R_f$  – величина шунтуючого резистора (рис.3).

Аналіз розрахункових залежностей показує, що найбільш інтенсивне гашення поля СД відбувається при включенні електричної ємності НЭ в ОВ. Включення паралельно ємності НЭ розрядного резистора  $R_{CH}$  дозволяє суттєво знизити рівень перехідного напруги до  $K_C=4,4$  замість  $K_C=8,3$ . Включення розрядного резистора кратністю 10 з автоматом гашення поля (АГП) забезпечує практично рівне швидкодії, але з більш високим рівнем перенапруги на ОВ ( $K_p=10$ ). При інвертуванні возбудителя з кратністю форсування 1,7 час гашення поля склав 0,75 с. Час гашення при розрядному резисторі – 0,6 с, а при включенні НЭ – 0,4 с.

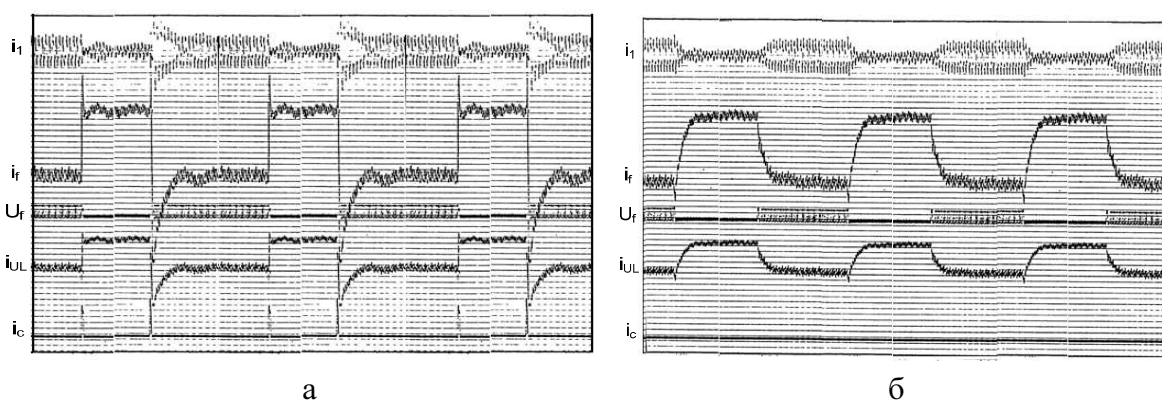
За критерій швидкодії прийнято час спадаючого результуючого магнітного потоку статора до величини  $0,2 \Psi_0$ , що виключає несинхронне включення СД

при самозапуске двигателя. Для оценки быстродействия режимов форсировки и гашения магнитного поля приведены экспериментальные исследования модельного синхронного двигателя. При синхронном ходе нагруженного СД проводились форсировка тока и гашение поля. На рис.4 приведены осциллограммы режимов форсировки и гашения поля СД в серийных тиристорных возбудителях и в разработанном устройстве.



- а – при инвертировании возбудителя,  $K_u=1,7$ ;
- б – при включении разрядного резистора в ОВ,  $K_p=10$ ;
- в – при разрядном резисторе и емкостном накопителе энергии,  $K_{дс}=4,4$ ;
- г – при включении в ОВ емкостного накопителя энергии,  $K_c=8,3$

Рисунок 3 – Расчетные зависимости процессов гашения поля модельного СД



- а – в разработанной схеме; б – в существующих возбудителях;

Рисунок 4 – Осциллограмма режимов форсировки возбуждения и гашения поля СД

Анализ приведенных осциллограмм показывает, что время достижения током возбуждения заданного значения при форсировке напряжения и гашении поля СД на порядок меньше в разработанном устройстве управления возбуждением по сравнению с аналогичными режимами серийных возбудителей.

**Выводы.** На основании исследований установлено, что для повышения устойчивости СД управление контуром возбуждения должно выполняться в функции напря-

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-