

РОЗДІЛ «ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА. ЕЛЕКТРОТЕХНІКА»

УДК 62-83

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

Днепропетровский государственный технический университет, г. Камьянское

АЛГОРИТМ АДАПТАЦИИ РЕЛЕЙНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЧЕТВЕРТОГО ПОРЯДКА, СИНТЕЗИРОВАННОЙ МЕТОДОМ N-i ПЕРЕКЛЮЧЕНИЙ, К ИЗМЕНЕНИЮ ФОРМЫ ПЕРЕХОДНОЙ ТРАЕКТОРИИ

Введение. Предельное быстродействие является структурным свойством систем разрывного управления. Однако применение классических методов оптимизации [1] в условиях характерного для электроприводов ограничения промежуточных координат сопряжено с чрезмерным усложнением процедуры структурно-алгоритмического синтеза, которое усугубляется с ростом порядка системы. Простое и эффективное решение данной проблемы было найдено авторами на основе обобщения теоремы об N интервалах [1] на каскадно-подчиненную структуру релейной системы управления. Разработанный в результате «метод N-i переключений» обеспечивает электромеханическим системам (ЭМС) максимальное при заданных ограничениях быстродействие [2] в сочетании с устойчивостью скользящих режимов всех контуров регулирования.

Постановка задачи. Реализация метода N-i переключений в виде универсальной численной процедуры изложена в работе [2] для систем произвольного порядка с фиксированными настройками. С массовым распространением цифровых контроллеров стала доступной адаптация настроек синтезируемых данным методом систем к изменению формы траектории оптимального по быстродействию переходного процесса в зависимости от диапазона воспроизводимого скачка задающего воздействия.

Рассмотрим нейтрально-устойчивый динамический объект четвертого порядка, моделируемый каскадом интегрирующих звеньев, вектор координат состояния которого обозначим

$$\left(\Omega, p\Omega, p^2\Omega, p^3\Omega, p^4\Omega \right) = \left(\Omega, \varphi, \omega, \varepsilon, a \right), \quad (1)$$

где Ω – регулируемая величина, a – управляющее воздействие, $p = \frac{d}{dt}$ – символ дифференцирования по времени.

В системе обозначений (1) математическое описание каскада регуляторов релейной системы подчиненного регулирования (СПР) четвертого порядка имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} u_{R\Omega} = u_{R1} = \varphi^* &= -\varphi_{\max} \cdot \text{sign} \left(\Omega - \Omega^* + K_{\Omega\varphi} \cdot \varphi + K_{\Omega\omega} \cdot \omega + K_{\Omega\varepsilon} \cdot \varepsilon \right) \\ u_{R\varphi} = u_{R2} = \omega^* &= -\omega_{\max} \cdot \text{sign} \left(\varphi - \varphi^* + K_{\varphi\omega} \cdot \omega + K_{\varphi\varepsilon} \cdot \varepsilon \right) \\ u_{R\omega} = u_{R3} = \varepsilon^* &= -\varepsilon_{\max} \cdot \text{sign} \left(\omega - \omega^* + K_{\omega\varepsilon} \cdot \varepsilon \right) \\ u_{R\varepsilon} = u_{R4} = a^* &= -a_{\max} \cdot \text{sign} \left(\varepsilon - \varepsilon^* \right) \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

где u_{Ri} – сигнал i-го (считая от входа) регулятора; символом «*» отмечены заданные значения координат, как входное, так и формируемые регуляторами; индексами «max» отмечены уровни ограничений канонических координат. Двойная индексация регуляторов указывает на их положение в иерархии каскада и на привязку к регулируемой переменной.

В работах [3-10] представленны аналитические результаты синтеза методом N-i переключений системы разрывного управления четвёртого порядка при настройке на отработку отдельных разновидностей переходной траектории. Задача настоящей работы состоит в построении интегрированного алгоритма расчёта параметров релейной СПР, призванного обеспечить автоматическую самонастройку такой системы на воспроизведение текущего динамического режима без дотяжек и перерегулирований.

Результаты работы. Параметрический синтез регуляторов $R_\varepsilon, R_\omega, R_\varphi$ внутренних контуров СПР (2) и аналитическое исследование их устойчивости выполнены в работах [3, 4] для позиционного электропривода в системе обозначений (1), что обеспечивает преимущество выражений коэффициентов обратных связей $K_{\omega\varepsilon}, K_{\varphi\omega}, K_{\varphi\varepsilon}$ при оптимизации по быстродействию систем более высоких порядков

$$K_{\omega\varepsilon} = \frac{\varepsilon_{\max}}{2 \cdot a_{\max}}, \quad K_{\varphi\omega} = \frac{\omega_{\max}}{2 \cdot \varepsilon_{\max}} + \frac{\varepsilon_{\max}}{2 \cdot a_{\max}}, \quad K_{\varphi\varepsilon} = \frac{\omega_{\max}}{4 \cdot a_{\max}} + \frac{\varepsilon_{\max}^2}{12 \cdot a_{\max}^2}. \quad (3)$$

В ходе оптимизации по быстродействию внешнего регулятора R_Ω каскада (2) методом N-i переключений в работе [5] на примере электропривода с упругой связью установлены однозначные аналитические зависимости коэффициентов обратных связей $K_{\Omega\varphi}, K_{\Omega\omega}, K_{\Omega\varepsilon}$ от уровней ограничений канонических координат системы четвёртого порядка:

$$K_{\Omega\varphi} = \frac{\varphi_{\max}}{2\omega_{\max}} + \frac{\omega_{\max}}{2\varepsilon_{\max}} + \frac{\varepsilon_{\max}}{2a_{\max}}; \quad K_{\Omega\omega} = \frac{\varphi_{\max}}{4\varepsilon_{\max}} + \frac{\omega_{\max}}{4a_{\max}} + \frac{\varphi_{\max}\varepsilon_{\max}}{4\omega_{\max}a_{\max}} + \frac{\omega_{\max}^2}{12\varepsilon_{\max}^2} + \frac{\varepsilon_{\max}^2}{12a_{\max}^2};$$

$$K_{\Omega\varepsilon} = \frac{\varphi_{\max}}{8a_{\max}} + \frac{\varphi_{\max}\varepsilon_{\max}^2}{24\omega_{\max}a_{\max}^2} + \frac{\omega_{\max}\varepsilon_{\max}}{24a_{\max}^2} + \frac{\omega_{\max}^2}{24\varepsilon_{\max}a_{\max}}. \quad (4)$$

Устойчивость скользящего режима R_Ω с коэффициентами обратных связей (3) аналитически подтверждается результатами работы [6], в которой коэффициенты (3) представлены функциями постоянных времени замкнутой системы

$$T_a = \frac{\varepsilon_{\max}}{a_{\max}}; \quad T_\varepsilon = \frac{\omega_{\max}}{\varepsilon_{\max}}; \quad T_\omega = \frac{\varphi_{\max}}{\omega_{\max}}. \quad (5)$$

Выраженные через них коэффициенты (3), (4) приобретают компактный вид

$$K_{\Omega\omega} = \frac{1}{4}(T_\omega T_\varepsilon + T_\varepsilon T_a + T_\omega T_a) + \frac{1}{12}(T_\varepsilon^2 + T_a^2), \quad K_{\Omega\varepsilon} = \frac{1}{8}T_\omega T_\varepsilon T_a + \frac{1}{24}(T_\omega T_a^2 + T_\varepsilon T_a^2 + T_\varepsilon^2 T_a),$$

$$K_{\Omega\varphi} = \frac{1}{2}(T_\omega + T_\varepsilon + T_a), \quad K_{\varphi\omega} = \frac{1}{2}(T_a + T_\varepsilon), \quad K_{\varphi\varepsilon} = \frac{1}{4}T_a T_\varepsilon + \frac{1}{12}T_a^2, \quad K_{\omega\varepsilon} = \frac{1}{2}T_a. \quad (6)$$

Расчёт коэффициентов обратных связей регуляторов (2) по формулам (5), (6) или (3), (4) обеспечивает воспроизведение переходной траектории (рис.1) с трапецидальной формой временных диаграмм всех промежуточных координат системы, присущей так называемому «режиму трапеции». В данном режиме достигаются все предельно установленные предельные значения канонических координат.

По мере уменьшения обрабатываемого скачка задающего воздействия отдельные координаты не достигают своих уровней ограничения в переходных процессах, что обуславливает изменение формы траектории и создаёт потребность в перерасчёте настроек регуляторов (2). К таким настройкам принадлежат амплитуды выходных сигналов реле, реализующие вышеупомянутые максимумы, а также коэффициенты обрат-

них связей, зависящие от них. В серии работ [7-9] задача перерасчёта максимумов канонических координат и основанных на их величинах настроек системы решена для особой

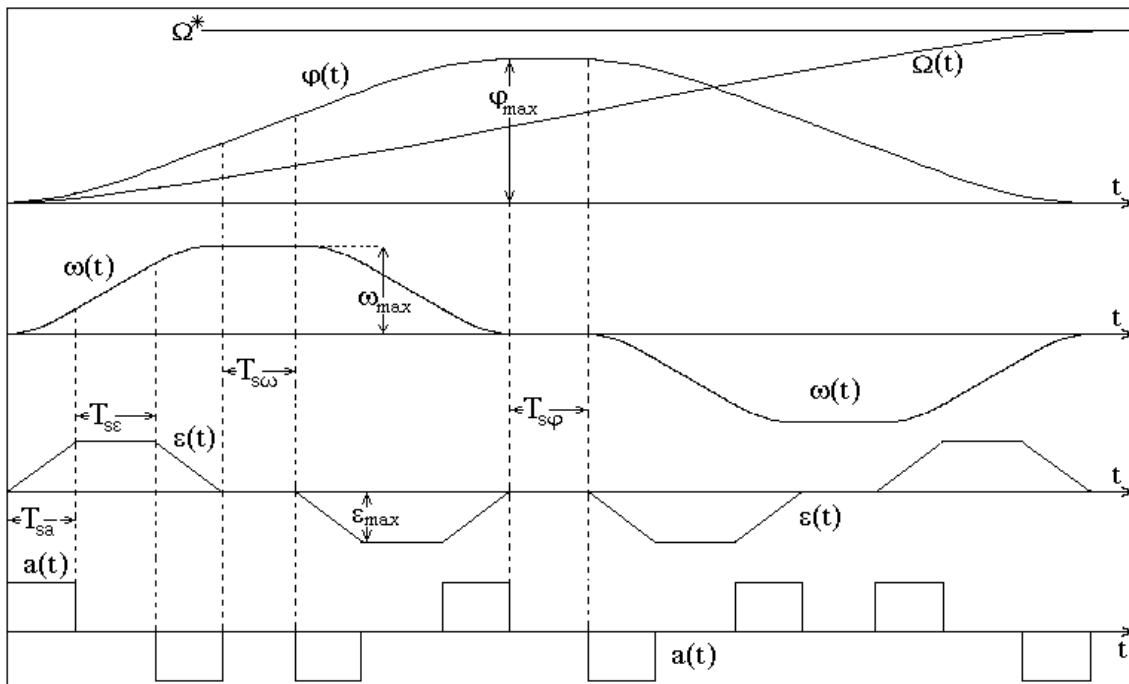


Рисунок 1 – Временные диаграммы режима трапеции

разновидности переходных траекторий, получаемых из траектории режима трапеции путём вырождения в ноль длительности интервалов стабилизации отдельных координат. Введём для их обозначения общий специфический термин «вырожденная трапеция k-й степени», где k указывает на количество промежуточных координат, интервалы стабилизации которых обращаются в ноль для траекторий данной формы. Так, на рис.2,а вырожден интервал $T_{s\varphi}$, на рис.2,б обращаются в ноль $T_{s\varphi}$, $T_{s\omega}$, а на рис.2,в – $T_{s\varphi}$, $T_{s\omega}$, $T_{s\varepsilon}$, что соответствует первой [7], второй [8] и третьей [9] степеням вырожденности трапециевидной траектории системы четвёртого порядка.

Семейство траекторий, представленных на рис.1, 2, в силу подобия их фрагментов описывается одинаковыми аналитическими выражениями, как и лежащие на них характерные точки переключений регуляторов (2), благодаря чему определение коэффициентов обратных связей согласно методу N-i переключений выполняется для них по единым формулам (6). Данное обстоятельство делает использование режимов вырожденных трапеций привлекательными для реализации алгоритма самонастройки системы четвёртого порядка на отработку произвольных скачков задающего воздействия. Однако следует заметить, что в отличие от систем третьего порядка данный тип переходных траекторий не является математически строго оптимальным по быстродействию. При настройке на режим вырожденной трапеции продолжительность переходных процессов превышает минимально возможную их длительность, определённую для данных уровней ограничений, на величину наименьшей постоянной времени системы T_a , что приемлемо с технической точки зрения.

Выполним построение блок-схемы алгоритма настройки СПР четвёртого порядка на воспроизведение произвольного скачка задающего воздействия Ω^* . Исходными дан-

ними для параметричного синтезу каскада регуляторів (2), наряду с величиною Ω^* , являются уровни ограничений канонических координат

$$\varphi_{\max}^*, \omega_{\max}^*, \varepsilon_{\max}^*, a_{\max}^* \quad (7)$$

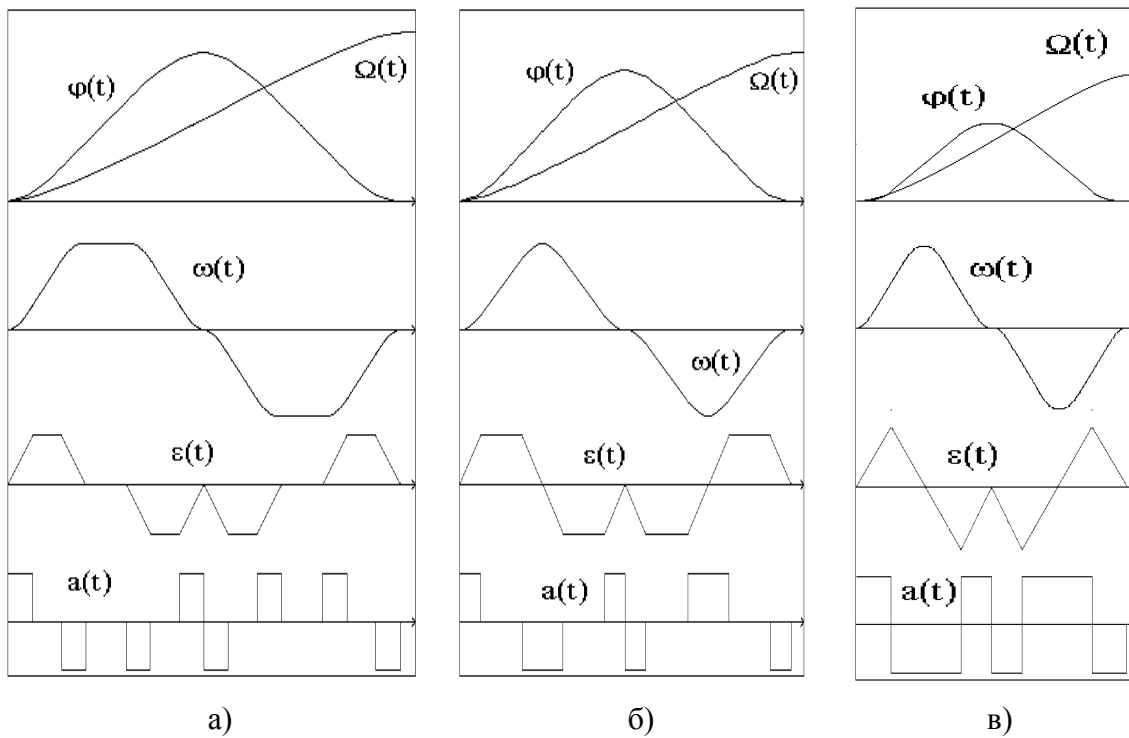


Рисунок 2 – Временные диаграммы вырожденных трапеций

продиктованные соображениями электрической и механической прочности ЭМС (1). Их присвоение текущим уровням ограничений

$$\varphi_{\max} = \varphi_{\max}^*, \omega_{\max} = \omega_{\max}^*, \varepsilon_{\max} = \varepsilon_{\max}^*, a_{\max} = a_{\max}^* \quad (8)$$

представлено на схеме разрабатываемого алгоритма (рис.3) блоком 1.

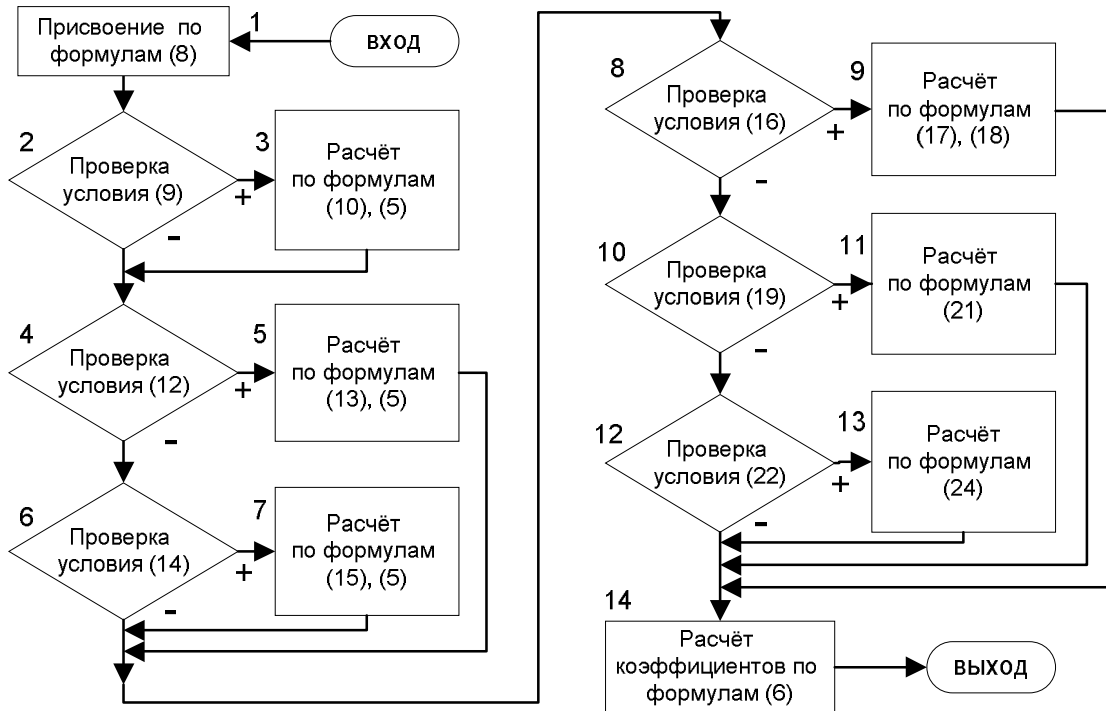


Рисунок 3 – Блок-схема алгоритма настройки системы четвертого порядка

Однако произвольные соотношения максимумов канонических координат (7) могут задавать физически нереализуемые траектории. Иными словами, некоторые из исходных значений максимумов (7) могут оказаться недостижимыми в реальных переходных процессах. Данное обстоятельство обуславливает необходимость проверки уровней ограничений (7) на предмет реализуемости определяемых ими переходных траекторий и последующей коррекции этих уровней с учётом соотношений, присущих трапециевидным траекториям. Эти меры требуется выполнить на начальном этапе настройки каскада (2), предваряющем расчёт коэффициентов обратных связей. Следует подчеркнуть, что в вышеприведенном замечании речь идёт не о настройке системы полного порядка, варианты которой разработаны в статьях [5-9], а о необходимости взаимного согласования ограничений именно промежуточных координат. Такой подход продиктован соблюдением условий реализуемости фрагментов переходной траектории, обеспечиваемым работой внутренних регуляторов каскада (2), образующих с частью объекта управления подсистемы пониженного порядка. Динамика этих подсистем в обозначениях (1) рассмотрена в работах [3], [4], [10-13] на примере систем регулирования скорости и положения электропривода, имеющих соответственно второй и третий порядок.

В статье [10] обоснована необходимость проверки достижимости максимума ускорения ε_{\max} при фиксированных ограничениях скорости и рывка ω_{\max}, a_{\max} на оптимальной по быстродействию траектории системы второго порядка. Необходимость коррекции ε_{\max} проверяется по условию, которое с учётом подстановок (5) приобретает вид

$$T_{\varepsilon} < T_a, \quad (9)$$

а расчёт физически реализуемого ограничения ускорения выполняется по формуле

$$\varepsilon_{\max} = \sqrt{\omega_{\max} \cdot a_{\max}}. \quad (10)$$

Заметим, что введение постоянных времени (5) в неравенство (9) и далее в ряд других неравенств и расчётных формул помимо придания единообразия аналитическим результатам, заимствованным из работ [3-13], способствует некоторому ускорению вычислений при выполнении разработанного алгоритма в реальном времени.

Включение в структуру разрабатываемого алгоритма (рис.3) блоков 2 и 3 по материалам работы [10] с перерасчётом постоянных времени (5) обеспечивает согласование только уровней ограничения ω_{\max} , ε_{\max} , a_{\max} . Задача взаимного согласования ограничений всех промежуточных координат, включая φ_{\max} , в явном виде не рассматривалась в отдельных публикациях, посвящённых разработке метода N-i переключений. Однако, материалы работ [11], [12], в которых выполнена оптимизация по быстрдействию режимов «треугольника» позиционного электропривода, могут быть полностью адаптированы к данной задаче благодаря использованию системы обозначений (1). Для этого в неравенствах и формулах из работ [11], [12] следует рассматривать заданное значение положения φ как уровень ограничения

$$\varphi^* = \varphi_{\max}, \quad (11)$$

формирование которого обеспечивает подсистема третьего порядка из каскада (2), по структуре эквивалентная системе позиционирования, замкнутой по каноническим координатам.

Воспользовавшись адаптированными результатами работы [11], введём в разрабатываемый алгоритм (рис.3) блок 4, осуществляющий проверку соотношения максимумов промежуточных координат на соответствие условию реализации малого треугольника, которое с учётом подстановок (5), (11) приобретает вид

$$\varphi_{\max} < 2\varepsilon_{\max} T_a^2. \quad (12)$$

При соблюдении условия (12) в блоке 5 выполняется согласование ω_{\max} , ε_{\max} , a_{\max} с предустановленным значением φ_{\max} по формулам, которые с учётом (5), (11) принимают вид

$$T_a = \sqrt[3]{\frac{\varphi_{\max}}{2 \cdot a_{\max}}}, \quad \varepsilon_{\max} = a_{\max} \cdot T_a, \quad \omega_{\max} = a_{\max} \cdot T_a^2, \quad (13)$$

после чего выполняется обновление постоянных времени (5) и переход к настройке на скачѐк задающего воздействия в блоках 8 и далее по схеме, представленной на рис.3.

Если максимумы (7) не удовлетворяют условию (12), необходимо проверить их на соответствие режиму большого треугольника и скорректировать при необходимости по результатам работ [12], [13]. Условие соответствия «большому треугольнику» из статьи [13] с учётом подстановок (5), (11) приобретает вид

$$\varphi_{\max} < \frac{1}{2} \omega_{\max} (T_a + T_\varepsilon). \quad (14)$$

Неравенство (14) проверяется в блоке 6 (рис.3), а расчётный максимум скорости определяется в блоке 7 по формуле из работы [12], которая после подстановки выражений (5), (11) приобретает вид

$$\omega_{\max} = \sqrt{\left(\frac{1}{2} \varepsilon_{\max} T_a\right)^2 + \varphi_{\max} \cdot \varepsilon_{\max}} - \frac{1}{2} \varepsilon_{\max} T_a. \quad (15)$$

После этого выполняется обновление постоянных времени (5) и дальнейшая настройка на скачок задающего воздействия (блоки 8 и далее по схеме). Если условие (4), как и (2), не выполнено, максимумы канонических координат не требуют коррекции.

Описанная выше часть схемы алгоритма до точки входа в блок 8 реализует только перерасчёт предустановленных максимумов из соображений физической реализуемости режима трапеции системой полного (четвёртого) порядка. Далее сформируем алгоритм настройки на режимы трапеции с различной степенью вырожденности траектории.

В работе [9] выполнен синтез параметров релейной СПР для случая варьируемых φ_{\max} , ω_{\max} , ε_{\max} , что соответствует вырожденной трапеции третьей степени (аналог «малого треугольника» по классификации режимов позиционирования). Для диапазона задающих воздействий, удовлетворяющего неравенству (блок 8 на рис.3)

$$8a_{\max}T_a^4 > |\Omega^*| > 0, \quad (16)$$

уровни ограничений φ_{\max} , ω_{\max} , ε_{\max} должны определяться по выражениям

$$\varphi_{\max} = \omega_{\max}T_{\omega}, \quad \omega_{\max} = \varepsilon_{\max}T_{\varepsilon}, \quad \varepsilon_{\max} = a_{\max}T_a, \quad (17)$$

где постоянные времени

$$T_{\omega} = T_{\varepsilon} + T_a, \quad T_{\varepsilon} = T_a, \quad T_a = 4\sqrt{\frac{|\Omega^*|}{8 \cdot a_{\max}}} \quad (18)$$

являются функциями скачка задающего воздействия Ω^* . При выполнении условия (16) вычисления по формулам (18), (17) выполняются в блоке 9, после чего в блоке 14 синтезируются коэффициенты обратных связей. В противном случае Ω^* проверяется на принадлежность другим диапазонам.

В работе [8] представлен синтез параметров релейной СПР для случая варьируемых φ_{\max} , ω_{\max} , что соответствует вырожденной трапеции второй степени. Для задающих воздействий, удовлетворяющих неравенствам

$$2\omega_{\max}(T_{\varepsilon} + T_a)^2 > |\Omega^*|, \quad (19)$$

$$|\Omega^*| \geq 8a_{\max}T_a^4, \quad (20)$$

максимальные значения первой и второй производных φ_{\max} , ω_{\max} выходной координаты Ω и постоянные времени системы должны определяться по выражениям

$$\varphi_{\max} = \omega_{\max}T_{\omega}, \quad \omega_{\max} = \varepsilon_{\max}T_{\varepsilon}, \quad T_{\omega} = T_{\varepsilon} + T_a,$$

$$T_{\varepsilon} = 3\sqrt{\frac{T_a^3}{27} + \frac{|\Omega^*|}{4 \cdot \varepsilon_{\max}}} + \sqrt{\frac{(\Omega^*)^2}{16 \cdot \varepsilon_{\max}^2} + \frac{T_a^3 \cdot |\Omega^*|}{54 \cdot \varepsilon_{\max}}} + 3\sqrt{\frac{T_a^3}{27} + \frac{|\Omega^*|}{4 \cdot \varepsilon_{\max}}} - \sqrt{\frac{(\Omega^*)^2}{16 \cdot \varepsilon_{\max}^2} + \frac{T_a^3 \cdot |\Omega^*|}{54 \cdot \varepsilon_{\max}}} - \frac{2}{3}T_a \quad (21)$$

как функции скачка задающего воздействия Ω^* . При выполнении условия (19), проверяемого в блоке (10), вычисления по формулам (21) выполняются в блоке 11, после чего в блоке 14 синтезируются коэффициенты обратных связей. В противном случае проверяется диапазон Ω^* , лежащий выше.

В статье [7] на примере электропривода с упругой связью представлен синтез параметров релейной СПР для случая варьируемого φ_{\max} , что соответствует отработке вырожденной трапеции первой степени (аналог «большого треугольника» по общепринятой классификации режимов позиционирования). Установлено, что для диапазона задающих воздействий, ограниченного неравенствами

$$\varphi_{\max} (T_a + T_\varepsilon + T_\omega) > \left| \Omega^* \right|, \quad (22)$$

$$\left| \Omega^* \right| \geq 2 \omega_{\max} (T_\varepsilon + T_a)^2, \quad (23)$$

максимальное значение первой производной $\dot{\varphi}_{\max}$ выходной координаты Ω и постоянная T_ω должны определяться по выражениям

$$\dot{\varphi}_{\max} = \omega_{\max} T_\omega, \quad T_\omega = \sqrt{\left(\frac{T_\varepsilon + T_a}{2} \right)^2 + \frac{\left| \Omega^* \right|}{\omega_{\max}}} - \frac{T_\varepsilon + T_a}{2} \quad (24)$$

как функции скачка задающего воздействия Ω^* . При выполнении условия (22), проверяемого в блоке (12), вычисления по формулам (24) выполняются в блоке 13, после чего в блоке 14 синтезируются коэффициенты обратных связей. Если задающее воздействие имеет величину не ниже верхней границы режима вырожденной трапеции первого порядка, определяемой неравенством (22), синтез коэффициентов в блоке 14 (рис.3) выполняется по уровням ограничений, определённым на момент входа в блок 8.

Выводы. Разработанный на основании результатов работ [3-13] интегрированный алгоритм настройки релейной СПР реализует во всём диапазоне задающих воздействий адаптацию параметров регуляторов к изменению формы расчётной переходной траектории, обеспечивая формирование переходного процесса с быстродействием, близким к оптимальному. Результаты настоящей работы ориентированы на применение в самонастраивающихся системах управления электроприводами с конечной жёсткостью кинематической цепи. Потенциал развития изложенной методики параметрического синтеза заключается в возможности использования иных форм расчётной траектории, специфичных для конкретных объектов управления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фельдбаум А.А. Основы теории оптимальных автоматических систем / Фельдбаум А.А. – М.: Наука, 1966. – 624с.
2. Релейные системы оптимального управления электроприводами / Садовой А.В., Сухинин Б.В., Сохина Ю.В., Дерез А.Л. – Днепродзержинск: ДГТУ, 2011. – 337с.
3. Садовой А.В. Параметрический синтез позиционных релейных систем подчиненного регулирования методом N-i переключений / Садовой А.В., Дерез А.Л. // Вестник НТУ ХПИ. Серия «Электротехника, электроника, электропривод», выпуск 45 "Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика". – Харьков. – 2005. – С.71-73.
4. Садовой А.В. Анализ характера скользящего режима оптимальной по быстродействию позиционной релейной СУЭП / Садовой А.В., Дерез А.Л. // Сборник научных трудов ДГТУ (технические науки). – Днепродзержинск: ДГТУ. – 2007. – Вып. 1(8). – С.140-144.

5. Садовой А.В. Параметрический синтез релейной системы подчиненного регулирования скорости электропривода с упругой связью / Садовой А.В., Дерез А.Л. // Вестник Кременчугского государственного политехнического университета. – Кременчуг: КГПУ. – Выпуск 3/2008(50). – Часть 1. – С.83-87.
6. Садовой А.В. Анализ устойчивости скользящего режима оптимальной по быстродействию системы четвертого порядка / Садовой А.В., Дерез А.Л. // Вестник НТУ ХПИ. Серия «Электротехника, электроника и электропривод». – Харьков, 2008. – Выпуск 30. – С.91-93.
7. Дерез А.Л. Оптимизация по быстродействию системы регулирования скорости электропривода методом N-i переключений при неопределённом максимуме упругого момента / Дерез А.Л., Садовой А.В.// Сборник научных трудов ДГТУ (технические науки). – Днепродзержинск: ДГТУ. – 2013. – Вып. 1 (21). – С.150-156.
8. Дерез А.Л. Синтез релейной системы управления четвёртого порядка методом N-i переключений при неопределённых максимумах первой и второй производных регулируемой координаты / Дерез А.Л., Садовой А.В.// Сборник научных трудов ДГТУ (технические науки). – Днепродзержинск: ДГТУ. – 2016. – Вып. 1 (28). – С.81-88.
9. Садовой А.В. Синтез методом N-i переключений релейной системы четвёртого порядка без внутренних ограничений / Садовой А.В., Дерез А.Л. // Сборник научных трудов ДГТУ (технические науки). – Днепродзержинск: ДГТУ. – 2008. – Вып. 1 (9). – С.167-171.
10. Садовой А.В. Рациональное ограничение ускорения электроприводов, синтезируемых методом N-i переключений / Садовой А.В., Дерез А.Л. // Вестник КГПУ. – Кременчуг. – 2006. – Вып. 3/2006 (38). – С.21-22.
11. Садовой А.В. Оптимизация по быстродействию методом N-i переключений режимов малых перемещений позиционного электропривода / Садовой А.В., Дерез А.Л. // Вестник КГПУ. – Кременчуг, 2007. – Вып. 3/2007 (44). – С.15-17.
12. Садовой А.В. Оптимизация по быстродействию режимов средних перемещений позиционных релейных СУЭП методом N-i переключений / Садовой А.В., Дерез А.Л. // Сборник научных трудов ДГТУ (технические науки). Тематический выпуск «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика». – Днепродзержинск: ДГТУ. – 2007. – С.420-422.
13. Дерез А.Л. Адаптация системы оптимального по быстродействию управления позиционным электроприводом к изменению формы переходной траектории / Дерез А.Л., Садовой А.В. // Электротехнические и компьютерные системы. – Киев: Техника. – 2014. – №15(91). – С.72-74.

Поступила в редколлегию 28.03.2017.

УДК 621.396.67:001.57

С'ЯНОВ О.М., д.т.н., професор
КОСУХІНА О.С., к.т.н., доцент
ПОЛЯКОВ Р.М., аспірант

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

**РОЗРАХУНКИ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ
НОВИХ І ПЕРСПЕКТИВНИХ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ**

Вступ. Електричні машини є основним видом пристроїв електромеханічного перетворення енергії. Практично вся електрична енергія виробляється механічним шляхом за допомогою генераторів. Більше 60% всієї електроенергії, що виробляється, перетворюється знову в механічну за допомогою електродвигунів. Серед їх різних типів найбільш застосовуються асинхронні двигуни завдяки їх істотним перевагам. Асинхронні двигуни малої й середньої потужностей належать до таких електромеханічних пристроїв, які порівняно легко й швидко з незначними витратами можна виготовити у вигляді макетних зразків і одержати експериментальним шляхом їх інтегральні характеристики, а також перевірити ідеї конструкційного й іншого характеру. Саме завдяки цьому на сьогодні створено сучасні серії асинхронних двигунів з досить високими техніко-економічними показниками, а також розроблено двигуни з поліпшеними пусковими, регульовальними й динамічними властивостями [1, 2].

Постановка задачі. Методика розрахунків економічної ефективності асинхронних двигунів включає в себе визначення економічної доцільності або необхідності розробки й виготовлення нових зразків асинхронних двигунів. Розрахунки економічної ефективності нової техніки повинні враховувати найбільш загальні випадки: створення принципово нової техніки, що не має аналогів; створення нової техніки, що замінює існуючу; удосконалення існуючої техніки та організації виробництва; створення нової техніки, що дає змогу відмовитися від імпорту закордонних товарів і збільшити експорт; продаж ліцензій на нові розробки тощо.

Взагалі рішення про виконання тих або інших робіт (проектів) приймається на підставі техніко-економічних обґрунтувань, основою яких є розрахунки економічного ефекту на річний обсяг виробництва в розрахунковому році. За розрахунковий рік береться перший рік після закінчення планованого (нормативного) терміну освоєння виробництва нової техніки. Як правило, це другий або третій календарний рік випуску нової продукції або використання нової технології виробництва.

Результати роботи. Визначення складових економічної ефективності проводиться за всіма роками планованого періоду виробництва й експлуатації нової техніки. Визначення економічного ефекту проводиться на основі зіставлення наведених витрат по базовому (старому) і новому виробу. Наведені витрати визначаються сумою собівартості виробу й нормативного прибутку:

$$З = С + E_n K, \quad (1)$$

де Z – наведені витрати на одиницю продукції, грн.; C – собівартість одиниці продукції, грн.; E_n – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень (як правило $E_n = 0,15$ для забезпечення єдиного підходу до оцінки економічної ефективності нової техніки в масштабах усього виробництва); K – питомі капітальні вкладення у виробничі фонди.

При визначенні річного економічного ефекту повинно бути забезпечено порівняння варіантів нового й базового зразків техніки за наступними критеріями: обсягом виробленої за допомогою нової техніки продукції; якісними параметрами; фактором часу; цінами на сировину, матеріали, енергію й іншими порівнянними показниками; соціальними факторами виробництва й використання продукції, включаючи вплив на навколишнє середовище.

При визначенні попереднього й очікуваного річного економічного ефекту у процесі вибору найбільш ефективного варіанта створення й впровадження нової техніки, а також при ухваленні рішення про постановку виробу на виробництво використовуються проектні, нормативні й планові показники.

Визначення ж фактичного річного економічного ефекту нової техніки проводиться з урахуванням даних калькуляцій і зведеного обліку витрат, що відбивають реальні витрати й обсяг виробництва.

У тих випадках, коли капітальні вкладення здійснюються протягом ряду років, а також коли поточні витрати й результати виробництва внаслідок зміни режиму роботи об'єкта нової техніки суттєво змінюються по роках експлуатації, необхідно враховувати фактор часу. Це здійснюється шляхом приведення до одного часу (початку розрахункового року) одноразових і поточних витрат на створення й впровадження нової й базової техніки й результатів їх застосування з використанням коефіцієнта

$$\alpha_t = (1 + E)^t, \quad (2)$$

де α_t – коефіцієнт приведення; $E = 0,1$ – норматив приведення; t – число років й результати, що відокремлюють витрати даного року від початку розрахункового року. Витрати й результати, що здійснюються й одержуються до початку розрахункового року, множаться на α_t , а після розрахункового року – діляться на цей коефіцієнт.

Сумарні капітальні вкладення, приведені до розрахункового року, визначаються за формулою

$$K_T = \sum_{n=1}^T K_n (1 - E)^{T-n}, \quad (3)$$

де K_n – капітальні вкладення n -го року, грн.; T – загальна тривалість створення й освоєння нової техніки, рік; n – порядковий рік створення й освоєння нової техніки; $T - n$ – число років приведення капітальних вкладень.

Розрахунки річного економічного ефекту від розробки, виготовлення й застосування нових асинхронних двигунів проводяться шляхом порівняння вихідних показників за собівартістю й витратами на збільшення виробничих основних і обігових фондів з показниками, отриманими після впровадження нових двигунів, і множення отриманих результатів на річний обсяг виробництва:

$$E = (Z_6 - Z_n) A_n = [(C_6 + E_n K_6) - (C_n + E_n K_n)] A_n, \quad (4)$$

де Z_6 й Z_n – наведені витрати на одиницю продукції, виробленої за допомогою базової (старої) і нової техніки, визначені за формулою (1), грн.; C_6 і C_n – собівартість одиниці продукції до й після впровадження нової техніки, грн.; K_6 і K_n – питомі капітальні витрати, тобто сума виробничих основних і обігових фондів на одиницю річного випуску продукції (питома фондомісткість) до й після впровадження нової техніки, грн.; A_n – річний обсяг виробленої продукції в натуральних одиницях після початку впровадження нової техніки.

При розрахунках зниження собівартості продукції враховуються тільки ті витрати, які змінюються у зв'язку із застосуванням цього заходу. У випадках, коли нова техніка впроваджується на діючому підприємстві й нові капітальні витрати додаються до діючих повністю, розрахунки річного економічного ефекту здійснюються за формулою

$$E = [(C_6 - C_n) - E_n K_d] A_n, \quad (5)$$

де K_d – нові капітальні витрати у виробничі основні фонди й у приріст (або зниження) обігових фондів, віднесені до одиниці річного випуску нової продукції.

Якщо в результаті впровадження двигунів з поліпшеними пусковими, регульовальними й динамічними властивостями підвищується довговічність двигуна, механізмів і машин, поліпшується якість і знижується собівартість продукції, що випускається, або досягаються інші переваги, то річний економічний ефект для виробника визначається як алгебраїчна сума річних економічних ефектів, отриманих у виробника й у споживача. При цьому використовується формула

$$E = \left(Z_{\text{б}} \frac{B_{\text{н}} P_{\text{б}} + E_{\text{н}}}{B_{\text{б}} P_{\text{н}} + E_{\text{н}}} + \frac{(I_{\text{б}} - I_{\text{н}}) - E_{\text{н}}(K'_{\text{н}} - K'_{\text{б}})}{P_{\text{н}} + E_{\text{н}}} - Z_{\text{н}} \right) A_{\text{н}}, \quad (6)$$

де $B_{\text{н}}/B_{\text{б}}$ – коефіцієнт обліку росту продуктивності праці; $B_{\text{б}}$ і $B_{\text{н}}$ – річні обсяги продукції, вироблені при використанні базового й нового двигунів, шт./рік; $(P_{\text{б}} + E_{\text{н}})/(P_{\text{н}} + E_{\text{н}})$ – коефіцієнт обліку зміни терміну служби нового двигуна в порівнянні з базовим; $P_{\text{б}}$ і $P_{\text{н}}$ – частки відрахувань від балансової вартості на повне відновлення (реновацію) базового й нового двигунів,

$$P = \frac{E}{(1 + E)^{T_{\text{с}}} - 1}, \quad (7)$$

$T_{\text{с}}$ – термін служби, рік; $I_{\text{б}}$ і $I_{\text{н}}$ – річні експлуатаційні витрати у споживача; $K'_{\text{б}}$ і $K'_{\text{н}}$ – супутні капітальні вкладення споживача.

Розрахунок річного економічного ефекту від виробництва й використання нових двигунів, що застосовуються у декількох сферах споживання, проводиться за формулою

$$E = \sum_{i=1}^n E_i A_i, \quad (8)$$

де n – кількість сфер споживання.

У складі капітальних вкладень виготовлювачів і споживачів нових двигунів урахуються як безпосередні капітальні вкладення, так і інші одноразові витрати, необхідні для створення й використання нових двигунів незалежно від джерел фінансування. До них відносяться такі показники [3]: витрати на науково-дослідні й дослідно-конструкторські роботи, включаючи випробування й доробку дослідних зразків; витрати на придбання, доставку, монтаж, демонтаж, технічну підготовку, налагодження й освоєння виробництва; витрати на поповнення обігових фондів, пов'язаних зі створенням і використанням нової техніки; вартість необхідних виробничих площ та інших елементів основних фондів; витрати на технічні заходи й установки, що запобігають негативним наслідкам впливу експлуатації техніки на природне середовище (запобігання забрудненню), а також на умови праці (зниження виробничого шуму й т. п.); збиток (зі знаком плюс) або прибуток (зі знаком мінус) від виробництва й реалізації продукції в період освоєння виробництва, що передує розрахунковому року.

При наявності розробок і можливості виготовлення декількох варіантів нових двигунів вибирається кращий з них. Критерієм найбільшої економічної ефективності служать найменші наведені витрати за нормативний термін окупності, визначені за формулою

$$Z_{\text{т}} = C_{\text{і}} + (C_{\text{а}} + C_{\text{о}})T_{\text{н}} + E_{\text{н}}(C_{\text{р}} + C_{\text{в}}) + C_{\text{е}}, \quad (9)$$

де C_1 – вартість виготовлення двигуна й витрати на його монтаж, грн.; C_a – річні витрати на активні втрати електроенергії, грн.; C_o – річні витрати на обслуговування двигуна (витрати на амортизацію й ремонти, компенсацію збитку від простою устаткування через вихід з ладу двигуна), грн.; C_p – одноразові витрати на розробку й доведення до впровадження, грн.; C_b – одноразові витрати на впровадження (на будівлю додаткових приміщень і споруджень, перепланування й переустаткування існуючих виробничих приміщень, придбання й монтаж нового або додаткового устаткування, виготовлення нового оснащення й інструменту та ін.), грн.; C_e – витрати споживача на компенсуючі пристрої й необхідні виробничі площі, грн.; T_n – нормативний термін окупності, рік,

$$T_n = \frac{K_n - K_b}{C_b - C_i} = 1/E_n. \quad (10)$$

При спрощених розрахунках витрати на виготовлення двигуна підрозділяються на такі укрупнені статті: витрати на матеріали; витрати на основну заробітну плату виробничих робітників; витрати на додаткову заробітну плату виробничих робітників і відрахування на соціальне страхування; цехові витрати, включаючи витрати на утримання та експлуатацію устаткування; загальнозаводські витрати; позавиробничі витрати на збут продукції (на упакування, транспортування до станції відправлення, рекламу й т.п.).

Витрати на матеріали складаються з витрат на активні матеріали $C_{ам}$ (витрати на електротехнічну сталь C_c , витрати на матеріал обмотки статора $C_{м1}$, обмоток короткозамкненого й фазного роторів $C_{м2}$):

$$C_{ам} = C_c + C_{м1} + C_{м2}; \quad C_c = m_c \Pi_c; \quad C_{м1} = m_{м1} \Pi_{м1}; \quad C_{м2} = m_{м2} \Pi_{м2}, \quad (11)$$

де m – заготівельна маса матеріалу, кг; Π – ціна матеріалу, грн./кг.

На основі зіставного аналізу встановлено закономірності, характерні для серій двигунів з однаковим класом нагрівостійкості ізоляції й властивостями електротехнічної сталі. Ці закономірності для різних матеріалів виражаються формулами

$$\lambda_{ам} = C_{ам}/C_m = \text{const}; \quad \lambda_{им} = C_{им}/C_m = \text{const}; \quad \lambda_k = C_k/C_m = \text{const}, \quad (12)$$

де C_m – сумарні витрати на матеріали для даного типу двигуна, грн. Для сучасних двигунів загального призначення з висотами осі обертання 160...250 мм $\lambda_{ам} = 0,52 \dots 0,54$.

Виходячи з першої формули (11), можна обґрунтовано рекомендувати спрощений спосіб розрахунків витрат на матеріали: 1) визначити для проектного двигуна $C_{сн}$, $C_{м1н}$, $C_{м2н}$ і $C_{ам}$ за формулами (11); 2) визначити для базового двигуна $C_{сб}$, $C_{м1б}$, $C_{м2б}$, $C_{амб}$ і $C_{мб}$ за плановими або звітними калькуляціями заводів-виготовлювачів; 3) визначити λ за формулами (12); 4) визначити витрати на матеріали нового двигуна:

$$C_{мн} = \frac{1,06 C_{амн}}{\lambda_{амб} K_{\lambda м}}, \quad (13)$$

де 1,06 – числовий коефіцієнт, що враховує транспортні витрати; K_{λ_M} – поправочний коефіцієнт, що враховує вплив на структуру витрат на матеріали особливостей нової конструкції двигуна, $K_{\lambda_M} = 1$. Коефіцієнт K_{λ_M} буде відрізнятися від одиниці при значній відмінності нових матеріалів від базових за класом нагрівостійкості ізоляції, властивостями електротехнічних сталей, цінами на застосовувані матеріали, конструкційним виконанням. Значення K_{λ_M} визначається експертною оцінкою.

До витрат на матеріали належать також витрати на напівфабрикати, покупні комплектуючі вироби, запчастини й штатний інструмент.

При розрахунках *трудоових витрат* на виготовлення нових двигунів виходять із повної собівартості двигунів

$$C = K_{BH} (C_M + C_T), \quad (14)$$

де K_{BH} – коефіцієнт обліку позавиробничих витрат; C_T – трудові витрати.

Встановлено, що для кожної серії асинхронних двигунів характерна сталість відношення

$$\lambda_M = C_M / C = \text{const}, \quad (15)$$

тому витрати на виготовлення нових двигунів можна визначити за формулою

$$C_H = C_{MH} / \lambda_{M\delta} K_\lambda, \quad (16)$$

де $\lambda_{M\delta} = C_{M\delta} / C_\delta$, визначається за плановими або звітними калькуляціями заводів-виготовлювачів; K_λ – поправочний коефіцієнт, обумовлений експертною оцінкою, що враховує особливості нових двигунів. Звичайне відношення λ_M міняється меншою мірою, ніж кожна зі складових собівартості. Для двигунів з висотами осі обертання до 250 мм можна прийняти $\lambda_M = 0,6 \dots 0,65$ й $K_\lambda \approx 1$.

Розрахунки витрат на виготовлення двигунів ведуться таким чином: 1) вибирається базовий двигун; 2) за плановими або звітними калькуляціями заводів-виготовлювачів для базового двигуна визначаються $C_{M\delta}$, C_δ і $\lambda_{M\delta}$; 3) визначається для нового двигуна C_{Mi} ; 4) експертною оцінкою визначається K_λ ; 5) за виразом (16) знаходиться C_H .

Витрати на основну заробітну плату визначаються за формулою

$$T_3 = a \sum_i \tau_i, \quad (17)$$

де a – середня оплата однієї нормогодини, грн.; τ_i – трудомісткість одного виду робіт з виготовлення двигуна, нормо-година; $\sum_i \tau_i$ – сумарна трудомісткість, нормо-година.

Важливість правильного визначення трудомісткості виготовлення характеризується наступними факторами: 1) при спрощених розрахунках витрати на додаткову заробітну плату виробничих робітників і соціальне страхування, цехові й загальнозаводські витрати обчислюються пропорційно T_3 ; 2) дані про трудомісткість виробів є вихідною базою найважливіших розрахунків планових, економічних і соціальних показників і, в першу чергу, розрахунків потреби в робочій силі.

Технологічні процеси виготовлення асинхронних двигунів при спрощених розрахунках групують за наступними п'ятьма видами робіт: 1) ливарні і зварювальні, τ_1 ;

2) обробка металів різанням, τ_2 ; 3) виготовлення магнітопроводів (штампування, термообробка, лакування, шихтування), τ_3 ; 4) ізолювання, виготовлення й укладання обмоток, просочення й сушіння, τ_4 ; 5) складання вузлове й загальне, контрольні-іспитові роботи, обробка й консервація, τ_5 .

При розгорнутих розрахунках групи τ_4 розділяють на два види робіт: ізолювання й укладання обмотки, просочення й сушіння; а групи τ_5 – на складання, випробування, обробку й консервацію.

Розрахунки трудомісткості виготовлення нових двигунів проводяться в такій послідовності: 1) вибирають базовий двигун; 2) за плановими або звітними калькуляціями заводів-виготовлювачів для базового двигуна обчислюють трудомісткість по окремих групах робіт $\tau_1 \dots \tau_5$ і середню оплату однієї нормо-години; 3) знаходять поправочні коефіцієнти експертною оцінкою $\lambda_{\tau_i} = \tau_{iH} / \tau_{i\sigma}$; 4) визначають $\lambda_{\tau_i} = \sum_{i=1}^5 \tau_{iH} = \sum_{i=1}^5 \lambda_{\tau_i} \tau_{i\sigma}$;

5) за допомогою експертної оцінки знаходять поправочний коефіцієнт для середньої оплати нормо-години $\lambda_a = a_H / a_\sigma$; 6) обчислюють $T_{3H} = \lambda_a a_\sigma \sum_{i=1}^5 \tau_{iH}$.

У статтю "Додаткова заробітна плата виробничих робітників" включаються виплати, передбачені трудовим законодавством або трудовими договорами за невідпрацьований на виробництві час (відпустки, оплата пільгових годин та ін.). Виходячи зі зразкової структури річного корисного фонду часу [3], приблизно вважають, що додаткова заробітна плата становить: $\frac{259 \cdot 8}{230 \cdot 7,52} - 1 \approx 0,2$ від основної, де 259 – число календарних робочих днів за рік; 230 – число робочих днів за рік; 8 – число годин робочого дня; 7,52 – середня тривалість робочого дня. У статтю "Відрахування на соціальне страхування" включаються виплати на ці цілі за встановленими ставками із загальної суми заробітної плати виробничих робітників.

Цехові й загальнозаводські витрати при спрощених розрахунках обчислюються пропорційно основній заробітній платі виробничих робітників. Вони залежать від ступеня механізації й автоматизації виробництва, серійності випуску, організації виробництва, системи керування ним і інших факторів. Для різних підприємств ці витрати можуть значно відрізнятися. Позавиробничі витрати обчислюються пропорційно виробничій собівартості двигуна.

Повна собівартість двигуна визначається за формулою

$$C_H = [C_{MH} + T_{3H} \times (1,28 + K_{\text{ц}} + K_{\text{о}})] K_{\text{вн}}, \quad (17)$$

де 1,28 – коефіцієнт витрат на аварійну плату й соціальне страхування.

Попередня ціна двигуна визначається за виразом

$$Ц_{\text{д}} = C_H (1 + p_H), \quad (19)$$

де p_H – норматив рентабельності, для серійних двигунів приймається $p_H = 12$.

Одноразові витрати на монтаж включаються в одноразові витрати на придбання двигуна й становлять $Z_M \approx 0,3Ц_{\text{д}} = 0,3 \cdot 1,12 = 0,34C_H$.

У повні витрати включаються й витрати на монтаж, тобто

$$C_{\text{ін}} = 1,34C_{\text{н}}. \quad (20)$$

Річні витрати на втрати активної електроенергії визначаються за формулою [3]

$$C_a = C_a t \xi \frac{P_2}{\eta_\xi} (1 + p_e - \eta_\xi), \quad (21)$$

де C_a – середня ціна електроенергії, грн/кВт·год; t – число годин роботи двигуна за рік; ξ – коефіцієнт завантаження; η_ξ – ККД двигуна при реальному завантаженні; p_e – середні питомі втрати потужності на 1 кВт·год. електроенергії, що передається в межах одного ступеня трансформації.

Витрати на обслуговування складаються з витрат на амортизацію, ремонти й компенсацію збитку від простою устаткування через вихід з ладу двигуна. У свою чергу амортизаційні відрахування складаються з відрахувань на реновацію й капітальний ремонт.

Відрахування на реновацію можуть бути розраховані за формулою (7), а відносні значення амортизаційних відрахувань для двигунів потужністю до 100 кВт можуть бути прийняті $p_{a1} = 0,055$ й для двигунів понад 100 кВт – $p_{a1} = 0,04$.

Витрати на амортизацію за один рік становлять $Z_{\text{ам}} = P_{\text{ам}} C_{\text{н}}$.

Витрати на обслуговування містять витрати на планово-попереджувальні (дрібні й середні) ремонти всіх двигунів і на відбудовні (капітальні) ремонти двигунів, що вийшли з ладу, протягом нормативного терміну окупності. До них належать й витрати на компенсацію збитку внаслідок виходу з ладу двигуна. Для орієнтовних розрахунків приймають, що всі ці витрати становлять 0,4...0,8 ціни двигуна залежно від тяжкості умов експлуатації.

З урахуванням надійності двигуна витрати на ремонт можна розрахувати за формулою

$$Z_{\text{рем}} = (S_y P_2 + S_k) \left[1 - \ell n R(T_{\text{нар}}) \right] \frac{t}{T_{\text{сл}}} + (K_m n_m S_m + K_{cp} n_{cp} S_{cp}), \quad (22)$$

де $T_{\text{нар}}$ – заданий наробок електродвигуна, год.; $R(T_{\text{нар}})$ – імовірність безвідмовної роботи протягом заданого наробку. Відповідно до діючих норм на двигуни серій 4А і 4АН $T_{\text{сл}} = 10000$ год. $R(T_{\text{сл}}) = 0,9$; S_y – питомий збиток від простоїв устаткування при виході з ладу двигуна, грн./кВт; S_k , S_{cp} і S_m – витрати на один капітальний, середній і дрібний ремонти відповідно, грн.; n_m і n_{cp} – число дрібних і середніх ремонтів на рік відповідно. Якщо умови експлуатації не обумовлені, то рекомендується приймати для двигунів зі ступенем захисту IP44 $n_{cp} = 2$, $n_m = 4$, а для двигунів IP23 – $n_{cp} = 3$, $n_m = 7,5$; K_m і K_{cp} – коефіцієнти, що характеризують зменшення потрібної кількості дрібних і середніх ремонтів на рік відповідно, завдяки підвищенню надійності нових двигунів. Вони беруться рівними від 1 до 0 і встановлюються експертною оцінкою значимості запроектованих заходів щодо підвищення надійності. Сумарні витрати на обслуговування на рік становлять $C_o = Z_{\text{ам}} + Z_{\text{рем}}$.

Досі будь-яких нормативних документів на визначення витрат на розробку й впровадження не існує. У кожному конкретному випадку при розрахунках економічного ефекту необхідно складати кошторис витрат по статтях.

За даними [4] в електротехнічній промисловості витрати на науково-дослідні й дослідно-конструкторські роботи становлять 3...3,3% річної вартості валової продукції. З урахуванням витрат на розробку технології, виготовлення оснащення, освоєння виробництва, технічне переозброєння підприємств, пов'язаних з випуском нової продукції, вони досягали 8...9%.

Аналіз ряду нових розробок показав, що для проектних розрахунків приблизно можна прийняти витрати на розробку й впровадження серійних двигунів, які становлять 10% їх повної вартості.

Витрати на компенсуючі пристрої визначаються за формулою

$$C_{\Gamma} = \Pi_{\Gamma} K_{\max n} \xi \frac{P_2}{\eta_{\xi}} \times (\operatorname{tg} \varphi_{\xi} - \operatorname{tg} \varphi_0) (1 + T_n p_0), \quad (23)$$

де Π_{Γ} – вартість 1 квар-год. компенсуючих пристроїв, грн./кВАр·год.; $K_{\max n}$ – коефіцієнт участі електродвигунів у максимальних навантаженнях у системі, $K_{\max n} = 0,25$; $\operatorname{tg} \varphi_{\xi} = \operatorname{tg}(\arccos \varphi_{\xi})$; $\cos \varphi_{\xi}$ – коефіцієнт потужності при фактичному завантаженні двигуна; $\operatorname{tg} \varphi_0 = \operatorname{tg}(\arccos \varphi_0)$; $\cos \varphi_0$ – нейтральний коефіцієнт потужності, приймається $\cos \varphi_0 = 0,9$; T_n – нормативний термін окупності, рік; p_0 – відносні витрати на обслуговування, включаючи амортизаційні відрахування.

Облік додаткових втрат потужності, обумовлених споживанням додаткової реактивної енергії, проводиться за формулою

$$P_{\Gamma} = p_{\Gamma} (\operatorname{tg} \varphi_{\xi} - \operatorname{tg} \varphi_0) \frac{P_{\Gamma}}{\eta_{\xi}} \xi, \quad (24)$$

де p_{Γ} – питомі втрати на генерування й передачу 1 кВАр потужності або питомі втрати, пов'язані з компенсацією 1 кВАр потужності за допомогою конденсаторних батарей. У першому випадку $p_{\Gamma} = 0,11$ кВт/кВАр, у другому – $p_{\Gamma} = 0,085$ кВт/кВАр.

Величина додаткових втрат потужності залежить від параметрів і режимів роботи двигунів і може бути віднесена до втрат у двигунах. Сумарні втрати двигунів називаються наведеними втратами, а ККД, розрахований з урахуванням додаткових втрат, – наведеним ККД

$$\eta'_{\xi} = \frac{\eta_{\xi}}{1 + p_{\Gamma} (\operatorname{tg} \varphi_{\xi} - \operatorname{tg} \varphi_0)}. \quad (25)$$

Критерій оптимальності (сумарні витрати) у більшості випадків при пошукових розрахунках визначається за наближеною формулою

$$Z_m \cong K(C_{\partial} + C_{\Gamma}) + C_a T_n + C_k, \quad (26)$$

де $K = 1 + T_n (p_{ам} + p_0)$ – коефіцієнт, що враховує амортизаційні відрахування й витрати на обслуговування при експлуатації двигуна; $p_{ам}$ – амортизаційні відрахування, $p_{ам} = 0,065$; p_0 – відносні витрати на обслуговування під час експлуатації, $p_0 = 0,069$; C_{∂} – виробнича собівартість двигуна.

При відсутності точних даних щодо витрати й вартості конструкційних матеріалів C_k і трудозатрат C_m розрахунки виробничої собівартості двигунів потужністю до 100 кВт проводять за спрощеними формулами (методики ВНДІЕМ)

$$C_k = \left[D_{1H}^2 K_{k1} (K_{k2} + D_{1H}) + K_{k3} D_{1H} \ell_1 (K_{k4} + D_{1H}) \right] C_k, \quad (27)$$

де K_{k1} , K_{k2} , K_{k3} , K_{k4} – конструктивні коефіцієнти; C_k – середньозважена ціна конструкційних матеріалів.

Трудові витрати визначаються за формулою

$$C_T = K_{T1} D_{a1}^2 (K_{T2} + \ell_1 / D_{1H}), \quad (28)$$

де K_{m1} й K_{m2} – коефіцієнти вартості виготовлення, $K_{m1} = 500$ і $K_{m2} = 0,4$.

Висновки. Методика розрахунку економічної ефективності нових та перспективних асинхронних двигунів побудована на базі принципів положень основних методик, інструкцій, нормативно-довідкових матеріалів до інструкцій та інших нормативних документів визначення економічної ефективності й річного економічного ефекту, одержаних у результаті впровадження нової техніки, погоджених і затверджених державними органами. Усі числові дані (ціни на матеріали, вартість трудових витрат і т. д.) вимагають уточнення як зараз, так і в майбутньому. У кожному конкретному випадку розрахунки річного економічного ефекту можуть бути зроблені за значно спрощеним алгоритмом залежно від того, який з показників найбільш вагомий.

ЛІТЕРАТУРА

1. Качура О.В. Індукційні реостати з покращеними масогабаритними показниками для асинхронних двигунів з фазним ротором: монографія / О.В.Качура, С.В.Количев, О.М.С'янов. – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2011. – 209с.
2. Могильников В.С. Теория, технология и режимы работы асинхронных двигателей с двухслойным ротором / Могильников В.С., Олейников А.М. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 20008. – 350с.
3. Стогній Б.С. Енергетична безпека України. Світовий та національний виклики [ТЕКСТ] / Стогній Б.С., Кириленко О.В., Денисюк С.П. – Київ.: Українські енциклопедичні знання, 2006. – 408с.
4. Каневский Л.М. О системе основных экономических показателей технического прогресса / Каневский Л.М. // Электротехника. – 1971. – №3. – С.49-52.

Надійшла до редколегії 27.02.2017.

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФІЛЬТРІВ ВИЩИХ ГАРМОНІК У МЕРЕЖІ 10 КВ МЕТАЛУРГІЙНОГО КОМБІНАТУ

Вступ. Аналізуючи ситуації з виникненням однофазних замикань на землю в мережах промислових підприємств, доводиться стикатися з тим фактом, що кількість uszkodжень кабельних мереж (пробоїв ізоляції, виникнення пожеж в кабельних тунелях) тісно пов'язана з рівнем вищих гармонік (ВГ) в цих мережах. Негативний вплив ВГ проявляється в тому, що високочастотні електричні поля викликають іонізаційні процеси в ізоляції кабеля, внаслідок чого знижується її електрична міцність і виникає пробій – однофазне замикання на землю. Вказаний вплив ВГ залежить від спектра генеруючих тиристорних перетворювачів частоти і рівня гармонік. Найбільш раціональним способом зниження рівня гармонік є установка силових резонансних фільтрів.

Існуюча практика застосування резонансних фільтрів ґрунтується на використанні комплекту фільтрів, налагоджених в резонанс по можливості точно на частоті гармонік, що переважають в амплітудному спектрі струмів нелінійних навантажень. Такий підхід застосовний у разі фільтрів малої і середньої потужності, коли відношення потужності батареї фільтра до потужності короткого замикання (К.З.) в точці підключення менше $0,5 \cdot 10^{-2}$. Більш високе значення цього параметра дозволяє уникнути посилення окремих гармонік напруги, перевантаження фільтрів за струмом і інших несприятливих явищ. Окрім цього застосування потужних фільтрів дозволяє понизити вимоги до точності налаштування, визначити прийнятні межі зниження коефіцієнта несинусоїдальності напруги. Відомо, що фільтри ВГ покращують баланс реактивної потужності у вузлі навантаження, а отже, впливають на режим напруги в мережі. Усі ці процеси взаємно пов'язані, до того ж залежать від характеру навантаження, яке змінюється за кількістю і якістю в широких межах.

Постановка задачі. На підставі параметрів активних і реактивних елементів фільтрів визначити коефіцієнти завантаження силових фільтрів за струмом і коефіцієнти ефективності роботи фільтрів, а також обґрунтувати доцільність застосування фільтра третьої гармоніки.

Результати роботи. Розраховано коефіцієнти завантаження за струмом і коефіцієнти ефективності фільтрів 3-5-7-11 гармонік, запропоновано заходи із зміни структури фільтро-компенсуючого пристрою.

Загальна характеристика вузла електропостачання. Вузол сортопрокатних цехів металургійного комбінату живиться від підстанції глибокого вводу КРЗ-5, де встановлено понижуючі трансформатори потужністю 2×32 МВАр напругою 150/10 кВ.

Вузол електропостачання має 3 цехових підстанції, які живлять групу сортопрокатних цехів, де встановлено перетворювальні агрегати, з'єднанні за 6-ти фазною схемою випрямлення, загальною потужністю майже 47 тисяч кВт. Спеціальні пристрої з компенсації реактивної потужності відсутні, тому коефіцієнт потужності вузла становить 0,63-0,72.

Рівень вищих гармонік в період максимального навантаження перевищує граничнодопустиму величину у 9%. Середньодобова реактивна потужність дорівнює близько 24 МВАр, при максимальному навантаженні сягає до 30 МВАр. Згідно з діючими рекомендаціями [1], у разі наявності вищих гармонік, установка батарей конденсаторів

без захисних реакторів не рекомендується (на період дослідження компенсуюча установка такого типу вийшла з ладу із-за перевантаження конденсаторів вищими гармоніками). Таким чином, проблему підвищення коефіцієнта потужності та подавлення вищих гармонік можна вирішити тільки із застосуванням силових резонансних фільтрів.

Вибір типу і потужності фільтро-компенсуючих пристроїв. За результатами проектною розробки було запропоновано на підстанції КРЗ-5 встановити індуктивно-ємнісні фільтри, налаштовані у резонанс на 3-5-7-11 гармоніки. При виборі параметрів фільтрів, а саме ємності, проектувальники керувалися необхідністю максимальної компенсації реактивної потужності навантаження з метою підвищення коефіцієнта потужності вузла електроживлення, тому загальна встановлена потужність фільтро-компенсуючих пристроїв (ФКУ) становить $Q_{\phi} = 16,2$ МВАр (табл.1).

1. *Параметри силових фільтрів.* В якості прикладу розглянемо визначення параметрів фільтрів для даної підстанції металургійного комбінату.

Основні параметри фільтрів наведено в табл.1. Відповідно до технічних умов експлуатації батарей конденсаторів (БК) тривало допустимі перевищення напруги і струму понад номінальних значень складають $C_U = 1,1$ і $C_i = 1,3$. Проте для конденсаторів, працюючих в схемах силових фільтрів, доцільно мати $C_U = 1$.

Таблиця 1 – Основні параметри фільтрів

Номінальна напруга фільтрів, кВ	Номер фільтрівної гармоніки	Встановлена потужність, МВАр	Номінальний струм, А*	Вимірювана ємність фази, мкФ	Індуктивність реактора фази фільтра на номінальній відпайці, мГн	Величина вимірювання індуктивності на номінальній відпайці, мГн	Генеруюча потужність фільтра, МВАр
10,5	3	2,7	140	$53,8^{+5,4}_{-2,7}$	$20,94 \pm 1,05$	0,510	2,09
	5	4,5	280	$109,6^{+11,0}_{-5,5}$	$3,2 \pm 0,19$	0,08	3,95
	7	2,7	165	$65,8^{+6,6}_{-3,3}$	$3,14 \pm 0,16$	0,08	2,32
	11	6,3	380	$153,8^{+15,4}_{-7,7}$	$0,55 \pm 0,033$	0,033	5,36

Примітка: * – найбільший струм фільтра з урахуванням гармонійних складових

У даному разі ця умова виконується, тому зробимо тільки перевірку конденсаторної батареї на перевантаження за струмом.

Умова неприпустимих навантажень БК за струмом запишеться у вигляді

$$\sqrt{I_{IB}^2 + I_{vB}^2} \leq C_i \cdot I_{H.B.} \quad \text{або} \quad \frac{I_{vB}}{I_{H.B.}} \leq \sqrt{C_i^2 - \alpha_v^2 \cdot K_v^2}$$

Виконавши деякі перетворення і ввівши $C_i^2 \sqsupseteq 1,6$, остаточно отримаємо умову вибору БК за струмом

$$Q_B \geq \frac{3U_{H.B.} \cdot I_{vB}}{\sqrt{1,6 - \alpha_v^2 \cdot K_v^2}} \quad (1)$$

Умову (1) можна трактувати як мінімальну потужність батареї, яка виключає перевантаження за струмом.

Використовуючи отримані значення струмів гармонік, визначимо мінімальну потужність батареї для кожного з фільтрів:

$$3\text{-я гармоніка: } Q_{\min} = 942 \text{ кВАр} < Q_{\text{уст}} = 2700 \text{ кВАр};$$

$$5\text{-а гармоніка: } Q_{\min} = 2050 \text{ кВАр} < Q_{\text{уст}} = 4500 \text{ кВАр};$$

$$7\text{-а гармоніка: } Q_{\min} = 650 \text{ кВАр} < Q_{\text{уст}} = 2700 \text{ кВАр};$$

$$11\text{-а гармоніка: } Q_{\min} = 865 \text{ кВАр} < Q_{\text{уст}} = 6300 \text{ кВАр}.$$

Розрахунки показують, що перевантаження батарей фільтрів за струмом не буде; проте слід враховувати вплив на величину струму у батареї відхилення параметрів фільтра від значень, що відповідають резонансному налаштуванню.

Коефіцієнти розладу фільтрів. На підставі технічно-обґрунтованих відхилень [2] за індуктивністю α_L , ємністю α_C і частотою α_ω розрахуємо для кожної гармоніки відносне відхилення реактивного опору фільтра від величини ідеального резонансного налаштування

$$\alpha = \frac{\Delta X_{\text{фв}}}{v \cdot \omega \alpha_{\text{ном}}} = \frac{(1 + \alpha_L)(1 + \alpha_\omega)^2(1 + \alpha_t \cdot \Delta t) - 1}{(1 + \alpha_C)(1 + \alpha_\omega)(1 + \alpha_t \cdot \Delta t)}. \quad (2)$$

Виконаємо вказані розрахунки для кожної з гармонік, використовуючи табл.1:
3-я гармоніка

$$L_{\text{ном}} = 20,94 \text{ мГн}; \quad \alpha_L = \frac{0,51}{20,94} = 0,024; \quad \alpha_t = 6 \cdot 10^{-4} \text{ 1/}^0\text{С}; \quad \text{причому } \Delta t = 20^0;$$

$$C_{\text{ном}} = 53,8 \text{ мкФ}; \quad \alpha_C = \frac{-2,7}{53,8} = -0,05; \quad \alpha_\omega = \frac{0,5}{50} \text{ - для всіх гармонік.}$$

$$\text{Коефіцієнт розладу } \alpha_3 = 0,0587.$$

5-а гармоніка

$$L_{\text{ном}} = 3,7 \text{ мГн}; \quad \alpha_L = \frac{0,08}{3,7} = 0,0216; \quad \alpha_t = 6 \cdot 10^{-4} \text{ 1/}^0\text{С};$$

$$C_{\text{ном}} = 109,6 \text{ мкФ}; \quad \alpha_C = \frac{-5,5}{109,6} = -0,05; \quad \alpha_\omega = 0,01.$$

$$\text{Коефіцієнт розладу } \alpha_5 = 0,0562.$$

7-а гармоніка

$$L_{\text{ном}} = 3,14 \text{ мГн}; \quad \alpha_L = \frac{0,08}{3,14} = 0,0255; \quad \alpha_t = 6 \cdot 10^{-4} \text{ 1/}^0\text{С};$$

$$C_{\text{ном}} = 65,8 \text{ мкФ}; \quad \alpha_C = \frac{-3,3}{65,8} = -0,05; \quad \alpha_\omega = 0,01.$$

$$\text{Коефіцієнт розладу } \alpha_7 = 0,0604.$$

11-а гармоніка

$$L_{\text{ном}} = 0,55 \text{ мГн}; \quad \alpha_L = \frac{0,015}{0,55} = 0,0273; \quad \alpha_t = 6 \cdot 10^{-4} \text{ 1/}^0\text{С};$$

$$C_{\text{ном}} = 153,5 \text{ мкФ}; \quad \alpha_C = \frac{-7,7}{153,5} = -0,05; \quad \alpha_\omega = 0,01.$$

Коефіцієнт розладу $\alpha_{11} = 0,0624$.

Коефіцієнти розладу будуть використані при визначенні коефіцієнтів завантаження фільтрів за струмом.

2. *Активні опори фільтрів.* Активний опір навіть при незначній абсолютній величині робить помітний вплив на ефективність роботи фільтра. Активний опір обумовлено опором реактора, виводів конденсаторів, сполучних шин і кабелів.

Розрахунково-аналітичний метод передбачає: розрахунок активного опору конденсаторів на основі кривих питомих активних втрат потужності у батареї конденсаторів

$$R_C = \frac{\Delta P_\Phi}{I_\Phi^2} = \frac{P_{уд} \cdot Q_\Phi}{I_\Phi^2} = \frac{P_{уд} \cdot I_\Phi^2 \cdot X_C}{I_\Phi^2} = P_{уд} \cdot X_C. \quad (3)$$

Значення $P_{уд}$ дане в технічній документації заводу-постачальника і дорівнює 1 кВт/МВАр. Омичний опір реактора вимірювався мостом постійного струму типу МО-62; додатковий опір від впливу поверхневого ефекту на частоті 1-ої гармоніки враховувався у розмірі 10%.

Опір ошиновки і кабелю розраховувався з урахуванням фактичних довжин і перерізів для кожної гармоніки.

Загальний активний опір фільтра для кожної гармоніки отримано підсумовуванням величин

$$R_{\Phi\Sigma} = R_C + R_{L1} + R_{\text{ош+каб}}, \text{ Ом} \quad (4)$$

Розрахунок активного опору силових фільтрів для 1-ї гармоніки:

$R_{\Phi\Sigma}, \text{ Ом}$	0,2972	0,0768	0,1106	0,0335
$R_{\text{експер.}}, \text{ Ом}$	0,3068	0,087	0,110	0,045

Порівнявши значення $R_{\Phi\Sigma}$ і $R_{\text{експер.}}$ бачимо, що значних відмінностей у вимірах немає, тому в подальших розрахунках використовуватимемо дані розрахунково-аналітичного методу, як достовірніші.

Добротність кола фільтрів. Вираз для активного опору фільтра може бути записаний у вигляді

$$R = \sqrt{v} \cdot \frac{\omega\alpha_p}{Q_r}, \quad (5)$$

де Q_r – умовна добротність фільтра, визначувана відношенням реактивного опору реактора і активного опору кола фільтра на частоті першої гармоніки; добротність кола фільтра дорівнює $Q_{rv} = \sqrt{v} \cdot Q_r$.

З урахуванням отриманих величин $R_{\Phi\Sigma}$ маємо:

3-я гармоніка: $Q_r = 22,1$; $Q_{r3} = 38,3$.

5-а гармоніка: $Q_r = 13,0$; $Q_{r5} = 29,0$.

7-а гармоніка: $Q_r = 8,9$; $Q_{r7} = 40,8$.

11-а гармоніка: $Q_r = 5,15$; $Q_{r11} = 29,5$.

Добротність кола фільтра в кінцевому результаті визначає ефективність його роботи.

3. Коефіцієнти завантаження і ефективності роботи фільтрів. Ідеальний фільтр повністю споживає струм гармоніки I_v генерованим нелінійним навантаженням, на яке він налаштований. Фактично споживаний струм може бути більшим або меншим від струму гармоніки I_v . Введемо позначення відношення вказаних струмів $I_{\phi v} / I_v$ і назовемо його коефіцієнтом K_{iv} завантаження фільтра за струмом. Величина коефіцієнта K_{iv} залежить від опору живлячої енергосистеми і коефіцієнта K_1 , що відбиває зміну цього опору на різних частотах; потужності батареї конденсаторів фільтра Q_B , яка входить у вираз для коефіцієнта завантаження через коефіцієнт K_p , що визначається відношенням потужності батареї фільтра до потужності короткого замикання живильної мережі в точці підключення фільтра, тобто параметра $K_p = Q_B / S_{к.з.}$.

Якщо нехтувати активним опором живлячої мережі, зважаючи на його незначну величину, то вираз для K_{iv} запишеться у вигляді

$$K_{iv} = \frac{\beta}{\sqrt{\frac{1}{v_p \cdot Q_r^2} + \left(\alpha \pm \frac{\beta^2}{K_1 \cdot K_p \cdot v_p^2} \right)}}, \quad (6)$$

де α і β – коефіцієнти відхилення параметрів фільтра від проектних значень, Q_r – добротність кола фільтра v -ої гармоніки, v_p – резонансна частота, на яку налаштований фільтр.

Визначимо значення параметра β_i коефіцієнта K_p для кожного фільтра, прийнявши величину потужності короткого замикання в точці підключення фільтрів, тобто на шини 10 кВ підстанції КРЗ-5, рівною 430 мВА:

3-я гармоніка: $\alpha_3=0,0507$; $Q_r=38,2$; $\beta=0,0508$; $K_p = 0,63 \cdot 10^{-2}$.

5-а гармоніка: $\alpha_5=0,0486$; $Q_r=29,0$; $\beta=0,0510$; $K_p 1,04 \cdot 10^{-2}$.

7-а гармоніка: $\alpha_7=0,052$; $Q_r=23,6$; $\beta=0,0543$; $K_p = 0,63 \cdot 10^{-2}$.

11-а гармоніка: $\alpha_{11}=0,0538$; $Q_r=17,1$; $\beta=0,0566$; $K_p = 1,46 \cdot 10^{-2}$.

Залежності $K_{iv}(Q_r)$ для випадку $\alpha < 0$ наведено на рис.1, а нижче – їх короткий аналіз.

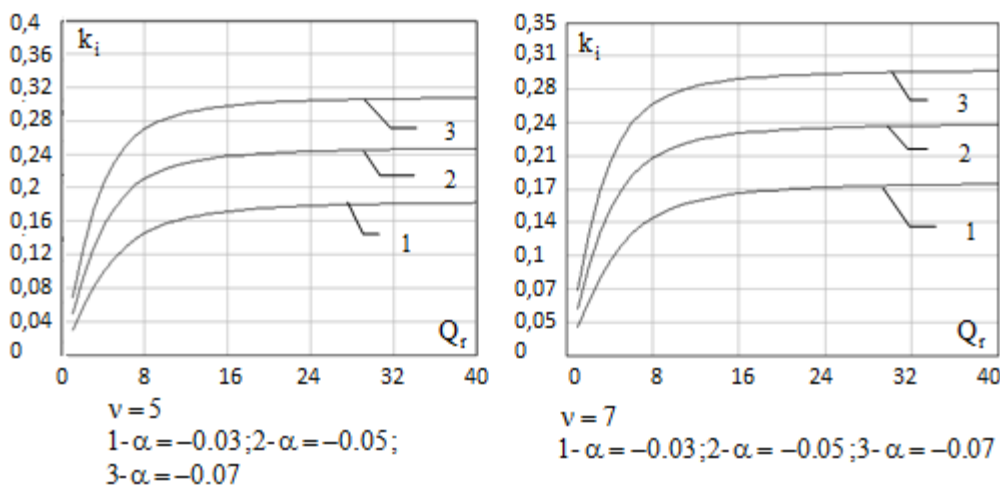


Рисунок 1 – Коефіцієнти завантаження фільтрів за струмом при ($\alpha < 0$)

Коефіцієнт ефективності роботи фільтра K_{ev} характеризує відносне зменшення гармоніки напруги в мережі і визначається відношенням провідності мережі до еквівалентної провідності мережі і фільтра. Вираз для K_{ev} має вигляд:

$$K_{ev} = \frac{\beta_r \cdot K_{iv}}{K_1 \cdot K_p \cdot v_p^2}, \quad (7)$$

недолік якого полягає в тому, що параметр добротності Q_r не входить сюди в явному вигляді. Аналіз показує, що ефективність роботи фільтра тим вища, чим менша величина K_{ev} , тобто чим менша залишкова напруга гармоніки в мережі, де встановлено силовий фільтр цієї гармоніки. За виразом (7) розраховано і побудовано графіки коефіцієнтів ефективності $K_{ev}(Q_r)$ (рис.2).

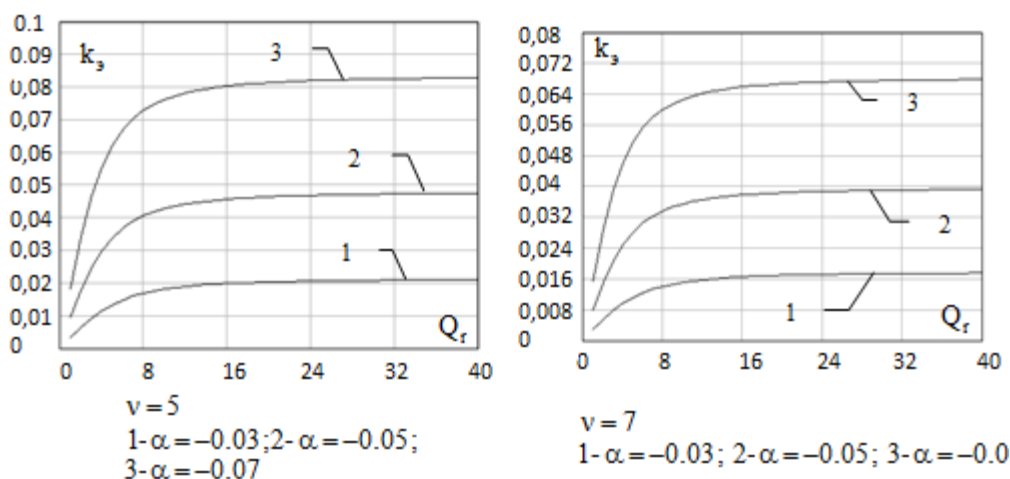


Рисунок 2 – Коефіцієнти ефективності фільтрів при ($\alpha < 0$)

Аналіз залежностей $K_{iv}(Q_r)$ і $K_{ev}(Q_r)$ дозволив зробити ряд важливих висновків:

1. На величину завантаження фільтра K_{iv} істотний вплив здійснює потужність батареї конденсаторів (через коефіцієнт K_p), тому при позитивному значенні α фільтри 5-ої і 7-ої гармонік необхідно проектувати з великою батареєю конденсаторів ($K_p > 0,4 \cdot 10^{-2}$), що в нашому випадку і виконується.

2. Перевантаження фільтрів 5-ої і 7-ої гармонік за струмом може настати тільки у разі негативного відхилення $\alpha > 0,1$ параметрів фільтрів від проектних значень (відповідно коефіцієнти $K_{i5} = 1,227$ і $K_{i7} = 1,43$); для фільтра 11-ої гармоніки перевантаження практично відсутнє.

3. При негативних значеннях відхилення ($\alpha = 0 \dots 0,1$) і потужних конденсаторних батареях ефективність фільтрів 5-ої і 7-ої гармонік в межах $K_e = 0,1$; ефективність фільтра 11-ої гармоніки до $K_{ev} = 0,01$, оскільки батарея конденсаторів має значну потужність ($K_p = 1,46 \cdot 10^{-2}$).

4. Вмикання фільтрів у схему електропостачання вузла дозволило підвищити коефіцієнт потужності до 0,95-0,98.

Аналіз ефективності роботи фільтра 3-ї гармоніки. У роботах [2, 3] показано, що у разі застосування тиристорних перетворювачів різних типів виникають вищі гармоніки $\nu = 5-7-11-13$ (табл.2).

Таблиця 2 – Значення вищих гармонік напруги ПС КРЗ-5 при різних комбінаціях вмикання ФКУ, $I_{\text{наб}} = 1,1-1,4$ кА

Частота ν	$U\%_{\nu}$				
	ФКУ – відімк. $K_{\text{НС}}=(5,1-7,1)\%$ $U_{\text{Ш}}=9,6$ кВ	ФКУ – 5,7 $K_{\text{НС}}=(3,1-4,4)\%$ $U_{\text{Ш}}=9,8$ кВ $I_5=210$ А $I_7=120$ А	ФКУ – 5,11 $K_{\text{НС}}=(2,1-3,8)\%$ $U_{\text{Ш}}=9,8$ кВ $I_5=210$ А $I_{11}=280-290$ А	ФКУ – 5,7,11 $K_{\text{НС}}=(1,8-2,3)\%$ $U_{\text{Ш}}=10,0$ кВ $I_5=210$ А $I_7=120$ А $I_{11}=280$ А	ФКУ – 3,7,11 $K_{\text{НС}}=(7,3-9,1)\%$ $U_{\text{Ш}}=10,25$ кВ $I_3=115$ А $I_7=200$ А $I_{11}=290$ А
3	0,3-0,4	0,4	0,5-0,7	0,6-0,9	0,1
4	0,0-0,1	0,3-0,5	0,1-0,4	1,3-1,6	0,2
5	0,3-1,5	0,4-0,5	0,3-0,7	0,4-0,6	3,1-8,1
7	0,2-0,8	0,1-0,2	1,5-3,4	0,1-0,2	0,1-0,2
11	1,4-1,9	0,8-1,1	0,1	0,1	ФКУ –
13	1,1-1,4	0,5-0,9	0,1	0,1	відімкнуті
17	0,8-1,3	0,5-0,9	0,3	0,1-0,3	через
19	0,5-1,1	0,5-0,7	0,3	0,0	перевантаження
23	1,2-1,6	0,5-0,6	0,2	0,1-0,2	ФКУ-7
25	1,2-1,5	0,4-0,6	0,2	0,1-0,2	струмом
26	0,0-0,5	0,3-0,4	0,1	0,1	5-ї гармоніки
27	0,1-0,5	0,3-0,4	0,1-0,2	0,1	
29	0,1-0,5	0,3-0,4	0,2	0,1	
30	0,0-0,6	0,3	0,1	0,1	
31	0,7-1,2	0,5-0,7	0,2	0,1-0,2	
32	0,1-0,6	0,2-0,6	0,1-0,2	0,1	
33	0,7-0,8	0,3-0,5	0,1	0,1	
34	0,2-0,6	0,2	0,1	0,1	
35	1,2-1,7	0,5-0,7	0,1-0,2	0,1-0,2	
36	0,2-0,9	0,3-0,4	0,1	0,1	
37	0,9-1,6	0,4-0,8	0,2	0,1	
38	1,6-1,9	0,5-0,7	0,1-0,2	0,1	
39	0,0-1,4	0,1-0,2	0,1	0,1	
40	0,1-0,8	0,3	0,0	0,1	

Однак, у нашому випадку проектувальники замість фільтра Ф-13 запропонували фільтр Ф-3, тобто для обмеження 3-ї гармоніки. Виміри вищих гармонік в різних режимах навантаження при різних схемах живлення споживачів показали, що рівень 3-ї гармоніки у середньому складає 0,25%, при деяких комбінаціях вмикання фільтрів збільшується до величини 0,6-0,9%. З табл.2 видно, що при комбінації фільтрів 3-7-11 пристрій ФКУ автоматично вимикається з-за перевантаження фільтра Ф-7, коли

струм зростав до 200 А, коефіцієнт несинусоїдальності значно перевищував допустиме значення ($K_{нс} \geq 11,1\%$).

Таким чином, доцільно було б внести у проект наступне коректування:

1) не встановлювати фільтр Ф-3, що значно зменшило б розміри фільтрокомпенсуючого пристрою, прийнявши до уваги його малу ефективність;

2) замість фільтра Ф-11 застосувати конденсаторну батарею без захисного реактора (не змінюючи її потужність), такий варіант можливий у разі наявності фільтрів Ф-5 та Ф-7, потужна конденсаторна батарея значно зменшить рівень гармонік $v \geq 23$.

Висновки. Вказані недоліки проектування можна пояснити недостатнім обсягом попередніх експериментальних досліджень, проведених на підприємстві. Наші дослідження роботи технологічної установки [5] показали ефективну роботу фільтрокомпенсуючого пристрою у разі наявності тільки фільтрів 5-ї та 7-ї гармонік, навіть без окремої конденсаторної батареї.

ЛІТЕРАТУРА

1. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промышленных предприятий / Жежеленко И.В. – 4-е изд., перераб. и дополн. – К.: Техніка, 2000. – 231с.
2. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промышленных предприятий / Жежеленко И.В. – К.: Техніка, 1974. – 184с.
3. Железко Ю.С. Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии / Железко Ю.С. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 135с.
4. Иванов В.С. Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий / В.С.Иванов, В.И.Соколов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 336с.
5. Хмельницький Є.Д. Експлуатаційне дослідження роботи статичного тиристорного компенсатора реактивної потужності в мережі живлення агрегату «під-ковш» / Хмельницький Є.Д. // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету (технічні науки). – Дніпродзержинськ: ДДТУ. – 2015. – Випуск 1(26). – 373с. – С.130-137.

Надійшла до редколегії 11.04.2017.

УДК 621.313.322

ХОМЕНКО В.І., аспірант
НІЗІМОВ В.Б., д.т.н., професор

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

ЕНЕРГООБМІННІ ПРОЦЕСИ МІЖ КОНТУРАМИ АВТОНОМНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Вступ. На даний час у світовій енергетиці спостерігається зростання автономних генеруючих установок (АГУ) на базі синхронних генераторів (СГ), які є незмінним джерелом електричної енергії у малонаселених місцевостях, де прокладання ліній електропостачання є недоцільним, а також у місцевостях, доступ до яких ускладнений (гірські місцевості, острова і т.д.) [1].

Суттєвим недоліком СГ є інерційність обмотки збудження (ОЗ).

Для підвищення стійкості автономних СГ та стабілізації вихідної напруги на застискачах статора застосовують релейне або параметричне форсування напруги збудження та системи автоматичного регулювання збудження (АРЗ).

Однак, при підключенні споживачів співставної потужності, наприклад, асинхронних двигунів з короткозамкнутим ротором СГ втрачають стійкість із-за інерційності контура збудження та значного динамічного падіння напруги, що призводить до відключення попередньо підключених споживачів.

Для підвищення динамічної стійкості СГ необхідно компенсувати електромагнітну інерційність контура збудження синхронного генератора шляхом зміни силової схеми та вмикання ємнісних елементів в інерційний контур, наприклад, ємнісних накопичувачів енергії (ЄНЕ). Причому вмикання ємнісних елементів можливо або послідовно з обмоткою збудження, або паралельно з ОЗ, що призводить до складних енергообмінних процесів в контурах синхронного генератора.

Постановка задачі. Теоретичне та експериментальне дослідження впливу параметрів ОЗ на енергообмінні процеси між контурами автономного синхронного генератора.

Результати роботи. Принципову схему системи збудження СГ АГУ з компенсованою ОЗ наведено на рис.1. На рис.1 позначено: ВТ – випрямляючий трансформатор; СКТ – система керування тиристорним перетворювачем ТП; ДЗН – джерело зарядної напруги; С – синхронний генератор; ДС – датчик струму; БФ – блок форсування; ТД – тепловий двигун; ТН – трансформатор напруги; ТС – трансформатор струму.

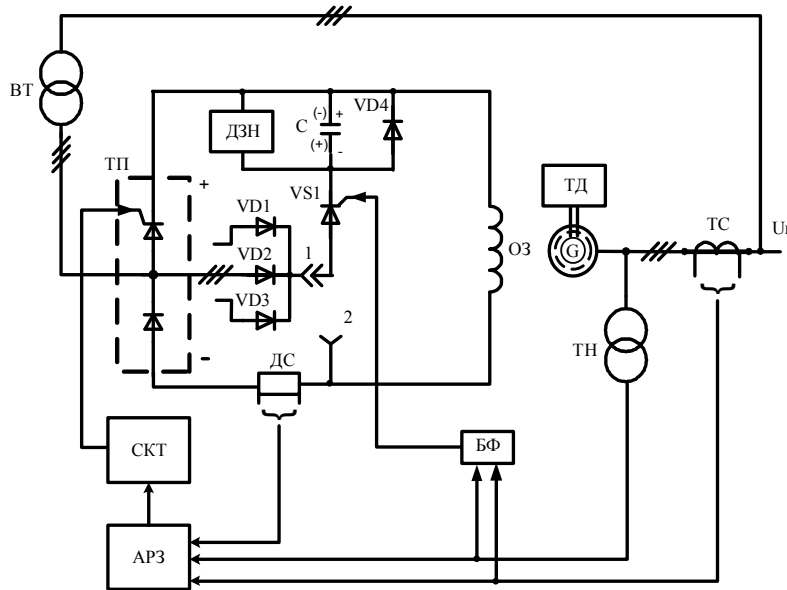


Рисунок 1 – Принципова схема системи збудження СГ

розряду конденсатора, система АРЗ встановлює необхідний рівень напруги збудження, а діод VD4 вимикає конденсатор із контура збудження.

Послідовна компенсація інерційності ОЗ забезпечується підключенням анода тиристора VS1 до клемми 1, а паралельна – до клемми 2.

При послідовній компенсації ОЗ величина напруги ЄНЕ може бути меншою від напруги збуджувача, тому що ЄНЕ виконує роль джерела струму. При паралельній компенсації ОЗ величина напруги ЄНЕ повинна бути більшою від форсувальної напруги

Стабілізація вихідної напруги СГ при підключенні споживачів з номінальним статичним навантаженням забезпечується системою АРЗ. При підключенні споживачів співставної потужності, що супроводжується зниженням напруги до $0,85U_H$ або зростанням струму вище $2I_H$, БФ вмикає тиристор VS1, що призводить до розряду конденсатора ЄНЕ на ТП і ОЗ та компенсації інерційності ОЗ. За час, що дорівнює чверті періоду коливального

збуджувача.

У випадку лінійного електричного кола, тобто коли всі його параметри зберігають свої значення постійними незалежно від діючих в електричному колі напруг і струмів, застосовують принцип накладання.

У випадку несподіваного вмикання ЕРС (U_{c0}) в схему, в якій вже діє одна (U_f) або декілька ЕРС, результуючий струм дорівнює алгебраїчній сумі струмів від раніше діючих ЕРС і від тільки увімкненої.

Рівняння напруг при розряді конденсатора в контурі збудження має вигляд:

$$U_R + U_L + U_C = 0. \quad (1)$$

Виразимо всі величини через струм i_f :

$$i_f R_f + L_f p i_f + \frac{1}{cp} i_f = 0, \quad (2)$$

де $p = \frac{d}{dt}$ – оператор диференціювання.

Прийmemo початкові умови: $i_f = \frac{U_f}{R_f}$, $U_c = U_{c0} \cdot e^{-\beta t}$, $\beta = \frac{R_f}{2L_f}$.

Після перетворень отримаємо залежність струму від величини напруги ЄНЕ:

$$i_f = U_{c0} \cdot e^{-\beta t} \cdot \frac{cp}{L_f cp^2 + R_f cp + 1}. \quad (3)$$

Представимо ці рівняння в пакеті Matlab/Simulink (рис.2).

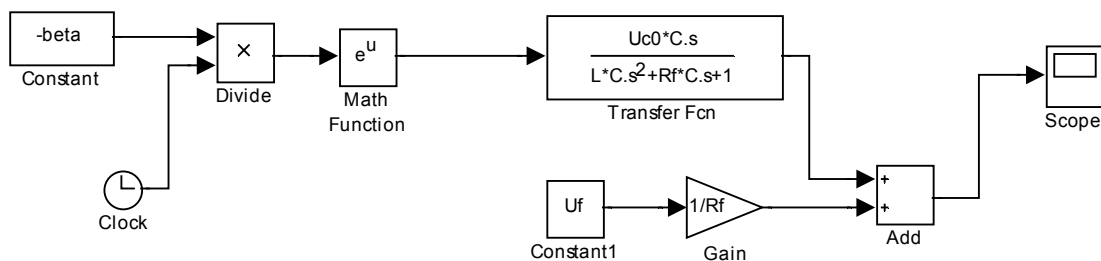
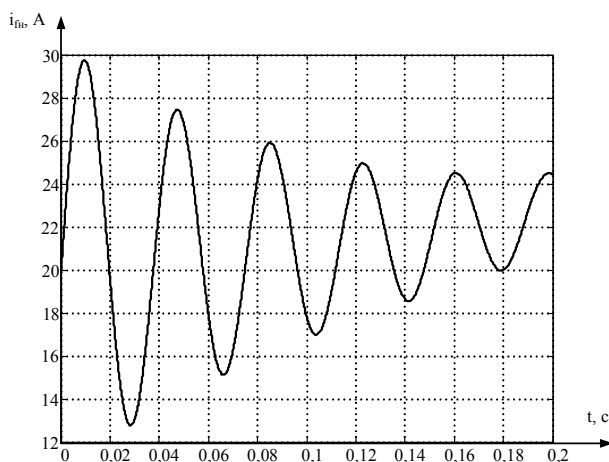


Рисунок 2 – Математична модель контуру збудження СГ при наявності струму збудження



114 Рисунок 3 – Розрахункові залежності струму збудження СГ

Розрахунок перехідних процесів виконано для синхронного генератора типу МСА-72/4: $P_H = 12$ кВт; $U_c = 230$ В; $i_{1H} = 37,6$ А; $U_{fH} = 27$ В; $i_{fH} = 23$ А; $n_H = 1500$ об/хв. Параметри контура збудження синхронного генератора:
 $U_{c0} = 100$ В; $L_f = 0,006$ Гн;
 $C = 0,0003$ Ф; $R_f = 1$ Ом; $U_\phi = 20$ В;
 $\beta = 8,33$.

Результати розрахунків наведено на рис.3. Аналіз розрахункових залежностей показує, що при часі $t_{\phi} = 0,01$ с струм i_{ϕ} сягає величини 29,8 А, а при часі $t_r = 0,02$ с струм понижується до величини 13,0 А. Визначимо величину напруги форсування: $U_{f\phi} = i_{f\phi} \cdot R_f = 29,8 \cdot 1 = 29,8$ В.

Таким чином, можна сформулювати алгоритм керування контуром збудження: при $t > 0$ і $p i_f = 0$ необхідно вивести конденсатор із контура збудження, при цьому $U_f = U_{f\phi}$ і $X_L = X_C$.

У випадку повної компенсації струм контура збудження буде безінерційно слідувати за напругою форсування.

Вказаний алгоритм керування контуром збудження СГ реалізовано в математичній моделі, наведений на рис.4.

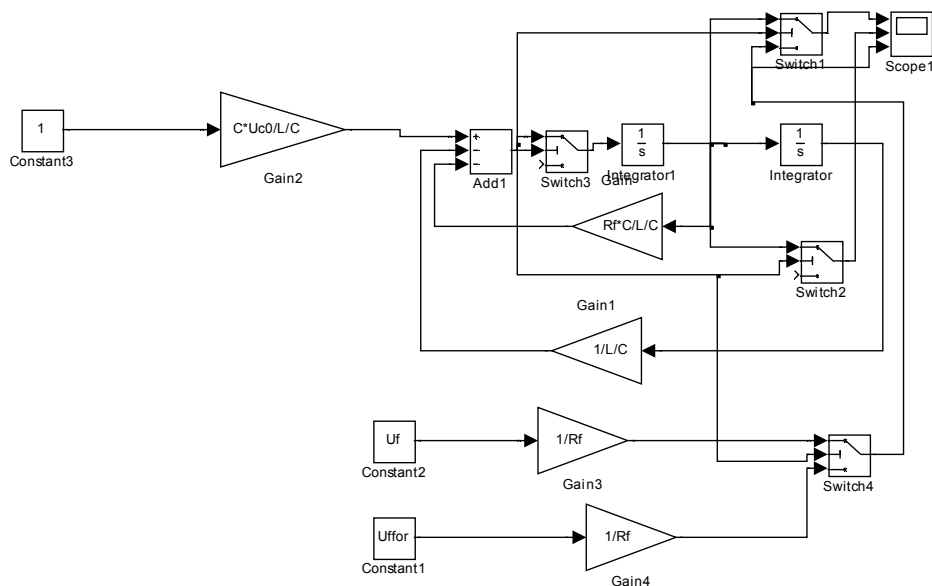


Рисунок 4 – Математична модель алгоритму керування контуром збудження СГ

Результати розрахунків з використанням методу накладання наведено на рис.5 при наступних даних: $i_{f\phi} = i_c$ з ємністю $C = 100-600$ мкФ при $L = 0.006$ Гн, $U_{c0} = 100$ В.

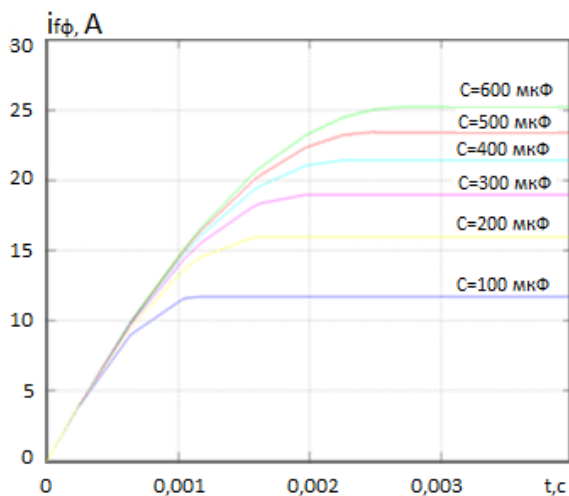


Рисунок 5 – Розрахункові залежності форсованого значення струму збудження СГ від величини ємно-

Результати теоретичних досліджень, присвячених математичному опису енергообмінних процесів між контурами СГ, висвітлені в роботах [2, 3].

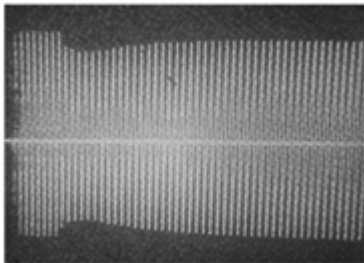
Для підтвердження ефективності впливу компенсованої системи збудження СГ на динамічну стійкість АГУ виконано експериментальні дослідження при підключенні споживачів з різним навантаженням.

Експериментальні дослідження виконано на СГ типу МСА 72/4А

потужністю 12 кВт, $U_{1H} = 230$ В; $i_{1НОМ} = 36,7$ А; струм ротора 23 А.

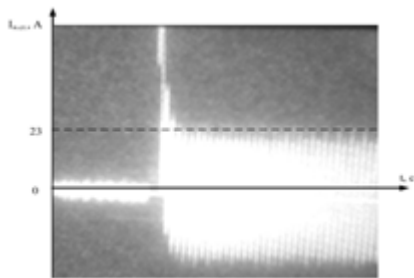
На рис.6 наведено осцилограми при підключенні статичного навантаження з некомпенсованим контуром збудження СГ, а на рис.7 – осцилограми з паралельно компенсованим контуром збудження.

Напруга статора $U_r = \sqrt{2} \cdot 230$ В



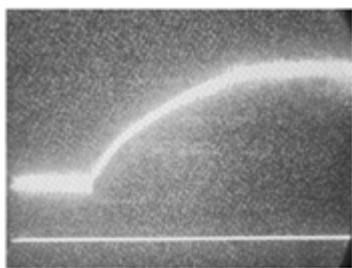
$$\Delta U_r = 16\%; \quad t_{cmaб} = 1c$$

Струм статора



$$I_{cm} = \sqrt{2} \cdot 23A$$

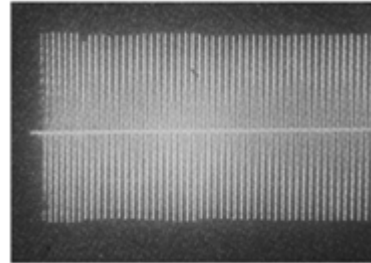
Струм збудження



$$I_{f_{noc}} = 13A; \quad I_{f_{фор}} = 65A$$

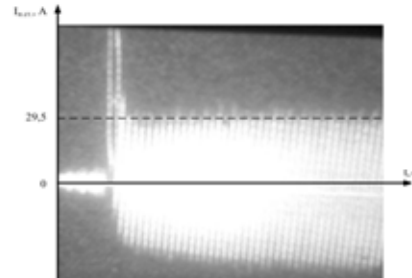
Рисунок 6 – Режим підключення статичного навантаження з некомпенсованим контуром збудження

Напруга статора $U_r = \sqrt{2} \cdot 230$ В



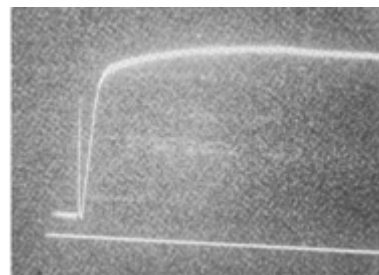
$$\Delta U_r = 3\%; \quad t_{cmaб} = 0,1c$$

Струм статора



$$I_{cm} = \sqrt{2} \cdot 29,5A$$

Струм збудження

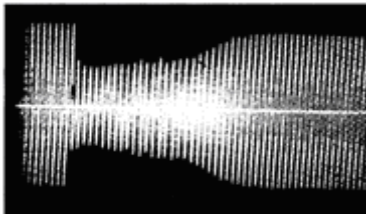


$$I_{f_{noc}} = 13A; \quad I_{f_{фор}} = 65A$$

Рисунок 7 – Режим підключення статичного навантаження з паралельно компенсованим контуром збудження

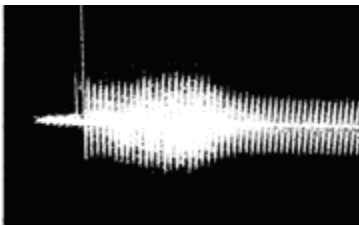
На рис.8 наведено осцилограми при підключенні АД потужністю 11 кВт до СГ з некомпенсованим контуром збудження, а на рис.9 – осцилограми з послідовно компенсованим контуром збудження.

Напряга статора $U_r = \sqrt{2} \cdot 230 \text{ В}$



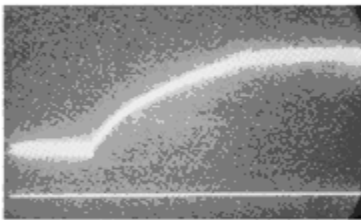
$\Delta U_r = 39\%$; $t_{stab} = 1,2 \text{ с}$

Струм статора



$I_{уст} = \sqrt{2} \cdot 36 \text{ А}$; $I_{max} = \sqrt{2} \cdot 70 \text{ А}$

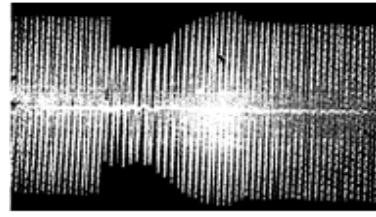
Струм збудження



$I_{f_{поч}} = 13 \text{ А}$; $I_{f_{фор}} = 117 \text{ А}$

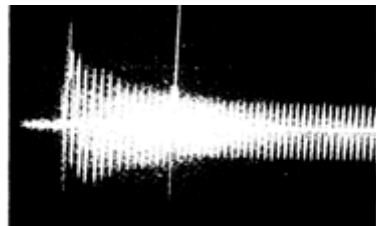
Рисунок 8 – Режим підключення АД з некомпенсованим контуром збудження

Напряга статора $U_r = \sqrt{2} \cdot 230 \text{ В}$



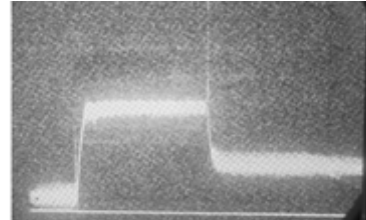
$\Delta U_r = 11\%$; $t_{stab} = 0,36 \text{ с}$

Струм статора



$I_{уст} = \sqrt{2} \cdot 36 \text{ А}$; $I_{max} = \sqrt{2} \cdot 70 \text{ А}$

Струм збудження



$I_{f_{поч}} = 13 \text{ А}$; $I_{f_{фор}} = 117 \text{ А}$

Рисунок 9 – Режим підключення АД з послідовно компенсованим контуром збудження

Висновки. Розроблена система з компенсованим контуром збудження забезпечує стійкість роботи АГУ та стабілізацію вихідної напруги СГ при підключенні споживачів співставної потужності та нормальне живлення попередньо підключених споживачів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Праховник А.В. Малая енергетика: распределенная генерация в системах электро-снабжения / А.В.Праховник. – Київ: Освіта України, 2007. – 462с.
2. Хоменко В.І. Підвищення стійкості роботи синхронної машини шляхом удосконалення системи збудження / В.І.Хоменко, В.Б.Нізімов, С.В.Количев. – Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків. – 2015. – 1/8(73). – С.31-36. – ISSN 1729-3774.
3. Хоменко В.І. Техніко-енергетичні показники автономної системи електроживлення на базі синхронного генератора / В.І.Хоменко, В.Б.Нізімов. – Zbiór artykułów

naukowych. Konferencji Międzynarodowej NaukowoPraktycznej "Inżynieria i technologia. Osiągnięcia naukowe, rozwój, propozycje na rok 2016" (30.12.2016). – Warszawa: Wydawca: Sp. z o.o. «Diamond trading tour», 2016. – С.66-70. – ISBN 978-83-65608-33-8.

Надійшла до редколегії 25.04.2017.