

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний технічний університет
"Харківський політехнічний інститут"

ВІСНИК

НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
"ХПІ"

**Серія: Проблеми удосконалення електричних машин
і апаратів. Теорія і практика**

№ 65 (1038) 2013

Збірник наукових праць

Видання засновано у 1961 р.

Харків
НТУ "ХПІ", 2013

Вісник Національного технічного університету "ХПІ".

Збірник наукових праць. Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ". – 2013. – № 65 (1038). – 135 с.

Державне видання

Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України

КВ № 5256 від 2 липня 2001 року

Збірник виходить українською і російською мовами.

Вісник Національного технічного університету "ХПІ" включено до "Переліку наукових Фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук", затвердженого постановою президії ВАК України від 26 травня 2010 р., № 1 – 05/4. (Бюлетень ВАК України № 6, 2010 р. стор. 3, № 20).

У квітні 2013 р. Вісник НТУ "ХПІ" Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів включений у довідник періодичних видань бази даних Ulrich's Periodical Directory (New Jersey, USA).

Координаційна рада:

Л.Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф. (**голова**);

К.А. ГОРБУНОВ, канд. техн. наук, доц. (**секретар**);

А.П. МАРЧЕНКО, д-р техн. наук, проф.; Є.І. СОКОЛ, чл.-кор. НАНУ, д-р техн. наук, проф.; Є.Є. АЛЕКСАНДРОВ, д-р техн. наук, проф.; А.В. БОЙКО, д-р техн. наук, проф.; Ф.Ф. ГЛАДКИЙ, д-р техн. наук, проф.; М.Д. ГОДЛЕВСКИЙ, д-р техн. наук, проф.; А.І. ГРАБЧЕНКО, д-р техн. наук, проф.; В.Г. ДАНЬКО, д-р техн. наук, проф.; В.Д. ДМИТРИЄНКО, д-р техн. наук, проф.; І.Ф. ДОМНІН, д-р техн. наук, проф.; В.В. СПІФАНОВ, канд. техн. наук, проф.; Ю.І. ЗАЙЦЕВ, канд. техн. наук, проф.; П.О. КАЧАНОВ, д-р техн. наук, проф.; В.Б. КЛЕПІКОВ, д-р техн. наук, проф.; С.І. КОНДРАШОВ, д-р техн. наук, проф.; В.М. КОШЕЛЬНИК, д-р техн. наук, проф.; В.І. КРАВЧЕНКО, д-р техн. наук, проф.; Г.В. ЛІСАЧУК, д-р техн. наук, проф.; О.К. МОРАЧКОВСКИЙ, д-р техн. наук, проф.; В.І. НІКОЛАЄНКО, канд. іст. наук, проф.; П.Г. ПЕРЕРВА, д-р екон. наук, проф.; В.А. ПУЛЯЄВ, д-р техн. наук, проф.; М.І. РИШЕНКО, д-р техн. наук, проф.; В.Б. САМОРОДОВ, д-р техн. наук, проф.; Г.М. СУЧКОВ, д-р техн. наук, проф.; М.А. ТКАЧУК, д-р техн. наук, проф.

Редакційна колегія серії:

Відповідальний редактор: Б.В. Клименко, д-р техн. наук, проф.

Заступник відповідального редактора: В.Ф. Болюх, д-р техн. наук, проф.

Відповідальний секретар: І.С. Варшамова, асистент.

Члени редколегії: В.Г. Данько, д-р техн. наук, проф.; В.Б. Клепиков, д-р техн. наук, проф.; В.І. Кравченко, д-р техн. наук, проф.; В.І. Мілих, д-р техн. наук, проф.; Сучков Г.М. д.т.н., проф.; Є.І. Сокол, д-р техн. наук, проф., Райнін В.Ю., д-р техн. наук, проф.

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ "ХПІ";
Протокол № 12 від 24.12.2013.

Е.И. БАЙДА, канд. тех. наук, доцент, НТУ "ХПИ"

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИНДУКТИВНОГО ОГРАНИЧИТЕЛЯ АВАРИЙНЫХ СВЕРХТОКОВ ТРАНСФОРМАТОРНОГО ТИПА

Рассмотрена математическая модель индуктивного ограничителя аварийных сверхтоков. Описана математическая постановка задачи и приведены примеры расчета устройства ограничения тока, базирующегося на изменении сопротивления вторичной обмотки трансформатора тока.

Ключевые слова: математическая модель, индуктивный ограничитель аварийных сверхтоков.

Введение. Энергетические потребности потребителей непрерывно возрастают. Это приводит к тому, что в случае аварии, сверхтоки в электрических сетях достигают значительных величин. Уже давно никого не удивляют выключатели с отключающей способностью (150-250) кА. Как правило, это выключатели категории *A*, конструкция которых подразумевает высокое быстродействие и мощную дугогасительную систему – быстродействующие выключатели с ограничением тока. Реальный ток, отключаемый такими выключателями, намного меньше заявляемого за счет эффекта токоограничения. В случае отказа самого выключателя, последствия аварии трудно предсказать. Поэтому возникает естественный вопрос: "Нельзя ли уменьшить значение сверхтока цепи перед его отключением автоматическим выключателем?" Ответ на этот вопрос был получен давно, когда было обнаружено, что значение тока короткого замыкания существенно зависит от величины сопротивления вторичной обмотки трансформатора тока и ее состояния (замкнута или разомкнута). На похожем принципе работают электрические реакторы, состоящие из катушек, включенные встречно каждая в свою линию. При одинаковых токах магнитные потоки взаимно компенсируются, а реактивное сопротивление и потери в магнитопроводе малы. В случае аварии в одной из линий результирующий поток возрастает, увеличивая индуктивность системы. Для эффективного ограничения тока необходимо: короткое замыкание в одной линии; результирующий поток не насыщает магнитную систему реактора.

Еще одной разновидностью индуктивного ограничителя тока является "реактор Мойжеса", испытанный в 30-е годы двадцатого столетия, представляющий собой мощный магнитный усилитель, индуктивность которого изменялась постоянным током подмагничивания.

В последние годы, в связи с открытием высокотемпературной сверхпроводимости, старые идеи и конструкции получили новое развитие. Основными типами таких сверхпроводниковых ограничителей тока (СОТ) являются резистивный или индуктивный ограничитель тока (все разнообразие конструкций и типов можно посмотреть в Интернете).

В данной статье рассмотрена математическая модель индуктивного ограничителя аварийного сверхтока трехфазной электрической цепи на базе трансформатора тока, включенного по обратной схеме (вторичная обмотка – короткозамкнутый экран с изменяемой проводимостью, первичная обмотка – катушка с несколькими витками, включенная последовательно с нагрузкой). В отличие от подобных расчетов [1] расчеты, приведенные в данной статье, базируются на уравнениях электромагнитного поля и уравнениях трехфазной электрической цепи.

Цель статьи. Разработка и проверка работы математической модели ограничителя аварийных сверхтоков трансформаторного типа на базе уравнений электромагнитного поля и трехфазной электрической цепи.

Основная часть. Допущения, принятые в модели:

- не рассматриваются причины изменения проводимости, это принимается как факт;
- модель рассчитывается в цилиндрической системе координат;
- анизотропный материал магнитопровода заменен на изотропный материал с эквивалентной проводимостью, соответствующей потерям в шихтованном магнитопроводе.

Общий вид расчетной модели и одного реактора показан на рис. 1.

В качестве исходных данных задаются фазные напряжения, номинальный ток и коэффициент мощности в номинальном режиме, а также кратность аварийного сверхтока и коэффициент мощности в аварийном режиме.

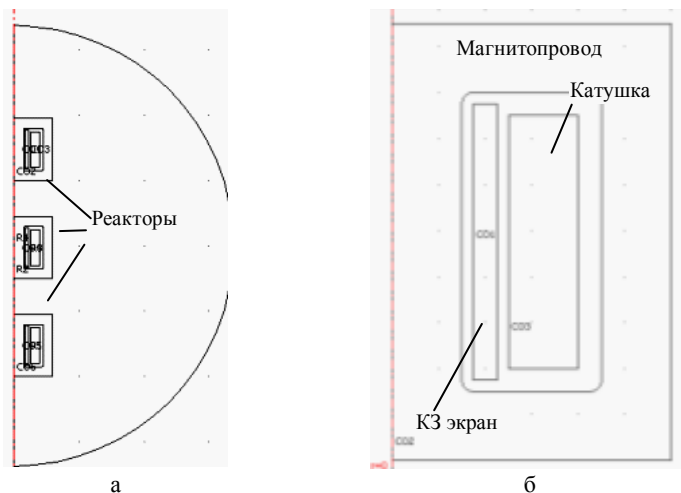


Рис. 1. Геометрия модели: а – расчетная модель; б – вид реактора.

Тогда

$$Z_n = \frac{U_n}{I_n}, R_n = Z_n \cdot \cos(\varphi_n), L_n = \frac{1}{\omega} \cdot \sqrt{Z_n^2 - R_n^2}, \quad (1)$$

где Z_n – номинальное полное сопротивление; R_n – активное сопротивление; φ_n – номинальный коэффициент мощности; L_n – индуктивность; ω – круговая частота.

Аналогично можно определить параметры цепи при аварийном сверхтоке:

$$Z_{kz} = \frac{U_n}{n \cdot I_n}, R_{kz} = Z_{kz} \cdot \cos(\varphi_{kz});$$

$$L_{kz} = \frac{1}{\omega} \cdot \sqrt{Z_{kz}^2 - R_{kz}^2}, \quad (2)$$

где n – кратность аварийного сверхтока по отношению к номинальному току.

Расчет активного сопротивления первичной катушки производился приближенно, исходя из задаваемой плотности тока в номинальном режиме. В этом случае:

$$S_k = \frac{I_n}{j_n}; R_1 = \frac{\rho}{S_k} \cdot \frac{V_1}{S_1} \cdot w_1, \quad (3)$$

где S_k – сечение провода первичной катушки; j_n – плотность тока в но-

минальном режиме; R_1 – активное сопротивление первичной катушки; V_1 – объем катушки; S_1 – сечение катушки; ρ – удельное сопротивление катушки; w_1 – число витков первичной катушки.

Эквивалентная проводимость изотропного магнитопровода определялось с учетом потерь в шихтованном магнитопроводе:

$$R_r = \frac{E^2}{P}, E = \frac{\omega \cdot B_m \cdot S_r}{\sqrt{2}}, \quad (4)$$

где R_r – эквивалентное сопротивление магнитопровода реактора; E – наводимая в магнитопроводе противо-ЭДС; P – мощность потерь в магнитопроводе; ω – круговая частота; B_m – усредненная максимальная индукция в магнитопроводе; S_r – сечение магнитопровода.

Если учесть, что:

$$R_r = \frac{1}{\sigma_r} \cdot \frac{V_r}{S_r^2}, \quad (5)$$

где σ_r – проводимость материала реактора; V_r – объем реактора.

Полные потери в стали можно принять равными:

$$P = p \cdot \frac{B_m^2}{B^2} \cdot V_r \cdot \gamma_r, \quad (6)$$

где p – справочное значение удельных потерь на единицу веса реактора; B – справочное значение магнитной индукции, для которой определены удельные потери; γ_r – плотность материала магнитопровода.

В этом случае:

$$\sigma_r = \frac{2 \cdot p \cdot V_r \cdot g}{B^2 \cdot \omega^2 \cdot S_r^4}. \quad (7)$$

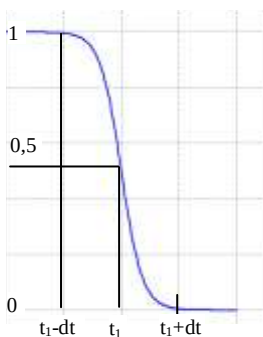


Рис. 2. Вид используемой единичной функции $f_1(t_1)$.

Задавшись геометрией магнитопровода и справочным значением индукции, можно определить проводимость изотропного материала.

Для имитационного моделирования режима короткого замыкания и последующего режима ограничения тока, нужно задать специальные функции, которые будут обеспечивать плавный переход от одних значений параметров цепи к другим. Задания таких функций обусловлено необходимостью обеспечения устойчивости и сходимости решения системы дифферен-

циальных уравнений электромагнитного поля и электрической цепи (использование ступенчатых функций Хэвисайда нежелательно). В программе использовалась функция, построенная на основе гиперболического тангенса (рис. 2).

Функции имитируют режим короткого замыкания цепи и увеличение проводимости вторичной обмотки реактора.

Математическая (или точнее мультифизическая) модель представляет собой систему уравнений электромагнитного поля и электрической цепи (рис. 3).

В качестве модели электрической цепи была выбрана трехфазная электрическая цепь с изолированной нейтралью.

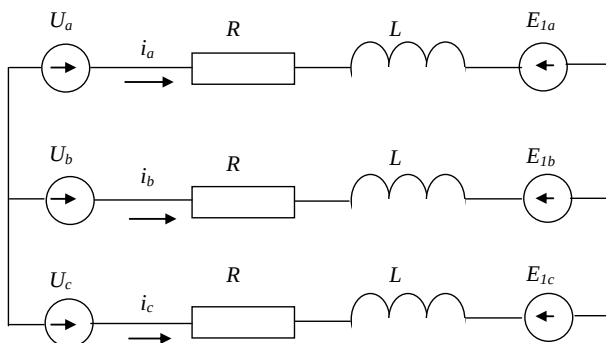


Рис. 3. Трехфазная сеть, где U – фазные напряжения; i – токи фаз; R – полное сопротивление каждой из фаз, включая сопротивление короткого замыкания, реактора и номинальное сопротивление; L – суммарная индуктивность, включающая индуктивность короткого замыкания и номинальную индуктивность; E – противо-ЭДС, наводимые в первичной катушке реактора.

Уравнения электрической цепи:

$$\begin{aligned}
 &L \cdot \frac{di_{1a}}{dt} + R \cdot i_a - E_{1a} - \left(L \cdot \frac{di_b}{dt} + R \cdot i_b - E_{1b} \right); \\
 &-(U_a - U_b) = 0; \\
 &L \cdot \frac{di_b}{dt} + R \cdot i_b - E_{1b} - \left(L \cdot \frac{di_c}{dt} + R \cdot i_c - E_{1c} \right); \\
 &-(U_b - U_c) = 0; \\
 &i_c = -i_a - i_b.
 \end{aligned} \tag{8}$$

В уравнениях (8):

$$E_{1k} = -\frac{w_1}{S_1} \cdot \int_{V_1} \frac{\partial(\bar{A}_{1k})_l}{\partial t} \cdot dV_1, \quad k = a, b, c$$

$$R = R_{kz} + R_n \cdot f(t_1) + R_1 \quad (9)$$

$$L = L_{kz} + L_n \cdot f(t_1)$$

где w_1 – число витков первичной катушки; S_1 – площадь первичной катушки; A_{1k} – проекция векторного магнитного потенциала на направление обхода контура внутри первичной катушки; R_1 – сопротивление первичной катушки реактора; V_1 – объем первичной катушки.

Система дифференциальных уравнений электромагнитного поля представлена в следующем виде с учетом системы координат и направления вектора $\bar{A}$.

1. Окружающая среда:

$$1 \cdot \frac{\partial A_\varphi}{\partial t} + \nabla \times \left(\frac{1}{\mu_0} \cdot \nabla \times A_\varphi \right) = 0, \quad (10)$$

где μ_0 – магнитная проницаемость среды; A_φ – угловая составляющая векторного магнитного потенциала.

2. Магнитопровод:

$$\sigma_r \cdot \frac{\partial A_\varphi}{\partial t} + \nabla \times \left(\frac{1}{\mu_0 \cdot \mu_r(|B|)} \cdot \nabla \times A_\varphi \right) = 0, \quad (11)$$

где σ_r – проводимость материала реактора; $\mu_r(|B|)$ – зависимость относительной магнитной проницаемости от модуля магнитной индукции.

3. Область первичной катушки:

$$\left\{ 1 \cdot \frac{\partial A_\varphi}{\partial t} + \nabla \times \left(\frac{1}{\mu_0} \cdot \nabla \times A_\varphi \right) = \frac{i_k \cdot w_1}{S_1}, \quad k = a; b; c. \right. \quad (12)$$

4. Область короткозамкнутого экрана:

$$(\sigma_0 \cdot f(t_2) + \sigma_{kon}) \cdot \frac{\partial A_\varphi}{\partial t} + \nabla \times \left(\frac{1}{\mu_0} \cdot \nabla \times A_\varphi \right) = 0, \quad (13)$$

где σ_0 – начальное значение проводимости экрана; σ_{kon} – конечное значение проводимости экрана.

В системе уравнений поля подразумевается, что окружающая среда и первичная катушка имеют небольшую, но не нулевую проводимость. Это практически не влияет на результат, но значительно облегчает процесс решения задачи.

Значения тока в короткозамкнутом экране рассчитаны по формуле:

$$i_2 = -(\sigma_0 \cdot f(t_2) + \sigma_{kon}) \cdot \int_{S_2} \frac{\partial A_\Phi}{\partial t} \cdot dS_2, \quad (14)$$

где i_2 – ток в короткозамкнутом экране; S_2 – поперечное сечение экрана.

Исходные данные для расчета при действующем значении фазного напряжения 220 В.

1. Номинальный режим: номинальный ток – 600 А; коэффициент мощности – 0,8; $R_n=0,29$ Ом; $L_n=0,7$ мГн.

2. Режим короткого замыкания: кратность аварийного тока – 50; коэффициент мощности – 0,1; $R_{kz}=0,73$ мОм; $L_{kz}=23$ мкГн.

3. Реактор: плотность тока – 2 А/мм²; число витков первичной катушки – 5; сопротивление реактора – 1,1 мОм; эквивалентная проводимость материала реактора – 19,9 Сим/м; характеристика намагничивания – электротехническая сталь (рис. 4).

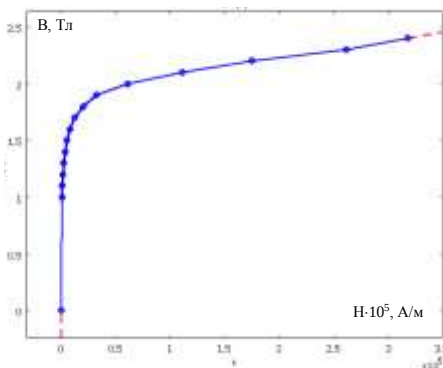


Рис. 4. Характеристика намагничивания материала реактора.

индивидуально – $t_{2a}=35$ мс; $t_{2b}=45$ мс; $t_{2c}=40$ мс.

На рис. 5 показано изменение токов в цепи первичной катушки.

Материал катушек реактора медь: начальная проводимость $5,9 \cdot 10^7$ Сим/м; конечная – $1 \cdot 10^3$ Сим/м.

Из данных следует, что благодаря реактору (только за счет его активного сопротивления), ток короткого замыкания будет меньше, чем теоретический.

Время начала короткого замыкания – $t_1=17$ мс; а начало ограничения тока для каждой из фаз задавалось

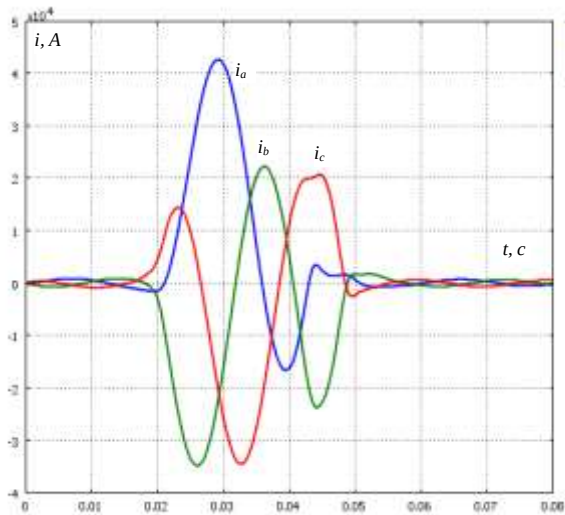


Рис. 5. Токи первичной катушки.

Из рис. 5 видно, что ограничение тока короткого замыкания достаточно эффективно – конечное значение практически не превышает номинального.

На рис. 6 показаны токи короткозамкнутого экрана.

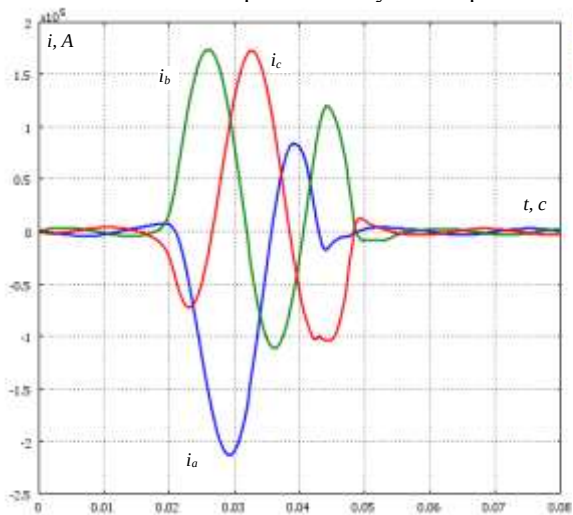


Рис.6. Токи короткозамкнутого экрана.

Значение токов короткозамкнутого экрана значительны, в номинальном режиме действующее значение – 3 кА. Однако тепловая мощность в номинальном режиме с учетом небольшого сопротивления экрана невелика:

$$P_2 = 3000^2 \cdot 3,55 \cdot 10^{-7} = 3,2 \text{ Вт.}$$

При расчетах такого рода представляют интерес значения падения напряжения на первичной катушке и в экране.

На рис. 7 показано изменение мгновенных падений напряжения на первичных катушках реактора.

Из рис. 7 следует, что напряжение на первичной катушке существенно возрастает, что и снижает аварийный сверхток. Необходимо отметить, что максимальное значение падения напряжения на первичной катушке в номинальном режиме равно 3 В, что составляет менее 1 % от фазного напряжения ($220 \cdot \sqrt{2}$), причем, только 1 В приходится на активное сопротивление.

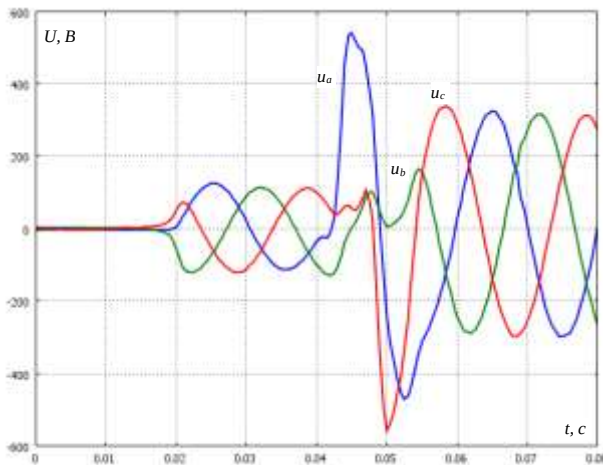


Рис. 7. Падение напряжения на первичной катушке реактора.

На рис. 8 показано падение напряжения на экране.

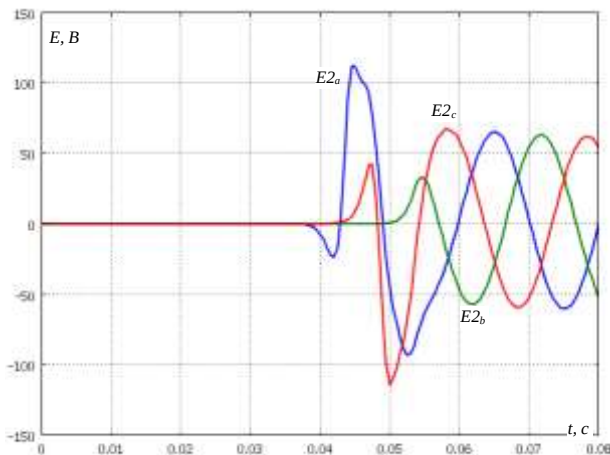


Рис. 8. График падения напряжения на короткозамкнутом экране.

В номинальном режиме падение напряжения составляет милливольты.

Выводы. Разработанная математическая модель, базирующаяся на уравнениях Максвелла, даёт возможность детально проанализировать процессы, происходящие в ограничителях токов трансформаторного типа, установить взаимосвязи между геометрическими, электрическими и физическими параметрами магнитопровода с параметрами катушек и параметрами электрической цепи. Применение таких устройств существенно ограничивает значения аварийного сверхтока, позволяя защищать электрическую сеть более эффективно.

Список литературы: 1. *Альтов В.А.* Токоограничивающие устройства трансформаторного типа / *В.А. Альтов, С.С. Иванов, В.В. Желтов, С.И. Копылов, М.В. Попова* // *Электро*. – Москва. – 2010. – № 5. – С. 46-54.

Поступила в редколлегию 20.12.2013

УДК 621.3.04: 621.316

Математическая модель индуктивного ограничителя аварийных сверхтоков трансформаторного типа / Байда Е.И. // *Вісник НТУ "ХПІ"*. Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2013. – № 65 (1038). – С. 3-13. Бібліогр.: 1 назв.

Розглянуто математичну модель індуктивного обмежувача аварійних надструмів. Описано математичну постановку задачі і наведені приклади роз-

рахунку пристрою, що обмежує струм та базується на зміні опору вторинної обмотки трансформатора струму.

Ключові слова: математична модель, індуктивний обмежувач аварійних надструмів.

The mathematical model of the inductive terminator of emergency over currents is observed. The mathematical statement of problem is presented and instances of calculation of the device of restriction of the current which is based on change of resistance of the secondary winding of the transformer of a current are resulted.

Keywords: fault current limiter inductive, mathematical model.

А.М. ГРЕЧКО, канд. техн. наук, НТУ "ХПИ"

ТЕХНОЛОГИИ БЫСТРОГО ПРОТОТИПИРОВАНИЯ – ОТ ДЕТСКОЙ ИГРУШКИ ДО МИРОВОГО ГОСПОДСТВА

В статье проведен аналитический обзор одной из наиболее перспективных на сегодняшний день технологий в машиностроении – быстрое прототипирование сложных трехмерных моделей.

Ключевые слова: 3D-технология, быстрое прототипирование, 3D-печать, технология машиностроения.

30-летию открытия стереолитографии посвящается...

Введение. "Распечатать", "отксерить", "снять копию"... еще совсем недавно, каких-то 15 лет назад, в конце XX века перечисленные выражения поставили бы многих из нас в тупик. Что там говорить, если автор принадлежит к тому поколению студентов, которое переписывало пропущенные лекции (честно признаюсь – случалось такое) от руки обычной шариковой ручкой! Услышав подобное, современные студенты открывают широко глаза и лишь разводят руками, держа смартфоны, планшеты, ноутбуки... Технический прогресс шагает по Земле семимильными шагами, входя практически во все области и сферы деятельности человека. Конечно же, не обделил он своим вниманием и такую область науки, как машиностроение.

В начале статьи перечисляются выражения, которые мы привыкли, в подавляющем большинстве случаев, употреблять применительно к нанесению *двумерного* графического изображения (или же текста) на бумагу. Но это двумерная печать – будь-то матричная, струйная, лазерная, сублимационная или же твердочернильная. Однако машиностроение, и другие области науки, зачастую имеют дело со сложными *трехмерными* объектами (детальками) и их соединениями (сборками), которые после их создания инженерами в виртуальном виде всё также, как правило, в конечном итоге переносятся в виде проекций, аксонометрий, сечений и разрезов всё на ту же пресловутую бумагу. Невольно возникает вопрос: нельзя ли каким-нибудь образом обойтись без оной и сразу, "без посредников", попробовать воспроизвести объемную трехмерную модель будущего изделия?

Оказывается – можно! Данным вопросом занимается одна из самых, на сегодняшний день, перспективных отраслей машиностроения, так называемая технология быстрого прототипирования (по англ. – Rap-

© А.М. Гречко, 2013

id Prototyping (RP-technology)) или, может быть, более известная в нашей стране просто под названием 3D-печать, то есть технология создания с помощью специальных устройств (3D-принтеров) физических объектов (моделей, макетов, образцов) из предварительно созданной виртуальной 3D-модели. Это относительно новая технология для машиностроения Украины, поэтому проведение подробного обзора и анализа данного вопроса является актуальной задачей. О популярности технологии и оборудования для 3D-печати красноречиво говорит и то, что достаточно ввести в ячейке любой поисковой системе просто фразу-запрос "3D" и в первой пятерке результатов поиска Вы увидите предлагаемый вариант-подсказку "3D-принтер" – более 3,5 миллионов ссылок!

Таким образом, **целью работы** является ознакомление читателей с существующими на сегодняшний день технологиями по быстрому прототипированию трехмерных объектов, проведение технического анализа и обзора современных достижений в новой, только зарождающейся на Украине технологии быстрого прототипирования.

Основная часть. Почему же необходимо именно не просто увидеть чертежи, а, как говорится, пощупать руками готовую деталь? Ответ заключается в следующих примерах.

Во-первых, по словам представителя американской компании "Pratt & Whitney" [1] – производителя авиационных двигателей для гражданской и военной авиации – "стоимость разработки сложного продукта может очень сильно снизиться, если предложить инженерам вместо десятков чертежей посмотреть на реальную деталь" [2].

Во-вторых, "распечатанная" 3D-модель может служить неким подобием опытного образца будущих серийно выпускаемых изделий, на котором возможно проведение определенных видов тестов для выявления недостатков конструкции. Например, всемирно известная автомобильная компания Porsche использовала на этапе разработки своего автомобиля серии 911 GTI прозрачную пластиковую 3D-модель трансмиссии с целью изучения циркуляции масла [2].

Проведя анализ и обзор публикаций по данной тематике [3-6], можно сделать вывод, что на сегодняшний день в мире наибольшее распространение получили две технологии быстрого прототипирования – *лазерная* и *струйная*, которые, в свою очередь, подразделяются на такие основные разновидности (приводятся как оригинальные англоязычные названия технологий и их соответствующие аббревиатуры, принятые и понимаемые во всем мире, так и их авторский перевод на русский язык – прим.):

- *лазерные технологии:*

- стереолитография (stereolithography apparatus или SLA-технология);
- селективное лазерное спекание (selective laser sintering или SLS-технология);
- ламинирование или послойное формирование моделей из листового материала (laminated object manufacturing или LOM-технология);
 - *струйные технологии:*
- моделирование методом наплавления (fused deposition modeling или FDM-технология).

Необходимо отметить, что перечислены далеко не все технологии быстрого прототипирования, а только наиболее распространенные и применяемые в мировой промышленности (дополнительно также можно выделить разработки компаний Objet Geometries (Polyjet-технология, принадлежащая сейчас компании Stratasys [7]) и технологию компании Z Corporation [8], ставшей в 2012 г. частью компании 3D Systems, речь о которой пойдет ниже). Далее рассмотрим более подробно суть каждой из приведенных технологий, принцип прототипирования, технологические возможности, ограничения по применению, преимущества и недостатки данных технологий.

Исторически первой технологией 3D-печати была разработана т.н. **стереолитография** (SLA-технология). Ее принцип был изобретен ровно 30 лет назад в 1983 г. американским ученым Чарльзом Халлом (Charles "Chuck" Hull) и запатентован им же в 1986 г. Название данной технологии происходит от слова "литография", что в переводе с древнегреческих слов означает: "λίθος" – "камень" и "γράφω" – "пишу".

Логическим продолжением проведенной исследовательской и патентной работы было основание Ч. Халлом собственной компании 3D Systems [9], которая, собственно, и занялась практическим внедрением в жизнь теоретических разработок. На рис. 1 показан автор разработки технологии стереолитографии Ч. Халл на фоне одного из первых образцов оборудования для 3D-печати с готовым "распечатанным" макетом диска для легкового автомобиля. Следует отметить, что компания 3D Systems существует и по сегодняшний день и по-прежнему продолжает занимать одно из лидирующих положений по выпуску оборудования для 3D-печати, несмотря на присутствие на данном сегменте рынка большого количества конкурирующих компаний.

Схема, описывающая процесс 3D-печати стереолитографическим способом показана на рис. 2, а ее суть заключается в следующем.

В рабочей емкости 5 (ванне) 3D-принтера находится специальная жидкость – фотополимер 6. Данный класс материалов (фотополимеры, кроме жидкости, также выпускаются в виде пленки – сухие фотополи-

меры и в виде спрея – лаковые фотополимеры, рис. 3) имеет одну особенность – под действием света, а именно ультрафиолетовой части его спектра, фотополимеры либо затвердевают (полимеризуются) практически мгновенно (как в нашем случае на рис. 2), либо же приобретают новые уникальные свойства, например, способность противостоять воздействию агрессивных сред, растворителей (такие фотополимеры, например, широко применяются при производстве печатных плат и называются фоторезистами). Жидкие же фотополимеры сегодня часто используются для изготовления печатей и штампов. С фотополимерами также большинство из нас встречалось и в повседневной жизни – при посещении стоматологических кабинетов и установке так называемых фотополимерных пломб.



Рис. 1 – Основатель стереолитографического способа 3D-печати Чарльз Халл с практическим результатом своего изобретения.

Для перехода жидкого фотополимера 6 в твердое состояние (в довольно прочный пластик) в установке используется ультрафиолетовый лазер 1. Лазерный луч 4, пройдя через фокусирующие линзы 2, попадает на вращающееся зеркало 3, которое направляет луч в рабочую емкость 5 с жидким фотополимером 6. Луч лазера проходит не по всей области (слою) фотополимера, который подается в рабочую зону дозированно в небольшом количестве и тонким слоем (несколько десятков микрон), а попадает лишь на те участки, которые подлежат затвердеванию. Данные участки задает специальная компьютерная программа, исходя из анализа виртуальной модели, созданной в той или иной си-

стеме автоматизированного проектирования (computer aided design, т.н. CAD-программы). Таким образом, лазерный луч как бы "сканирует" рабочую плоскость фотополимера и формирует отдельные твердые участки слоя детали, пока не воспроизведет на пластике одно из сечений будущей модели (например, нижняя часть детали 9 на рис. 2).

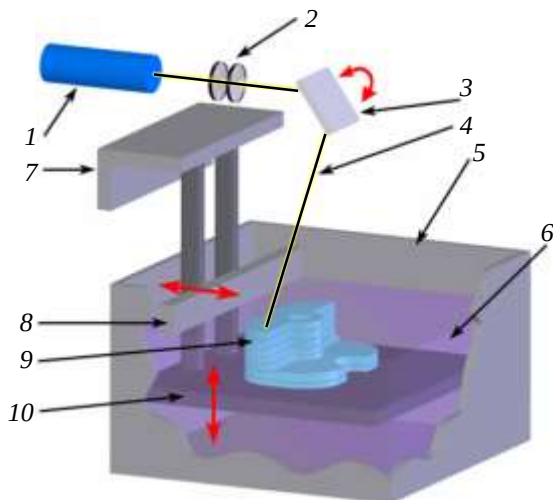


Рис. 2 – Схема процесса 3D-печати стереолитографическим способом:
1 – лазер; 2 – фокусирующие линзы; 3 – вращающееся зеркало; 4 – лазерный луч; 5 – рабочая емкость (ванна); 6 – жидкий фотополимер; 7 – мобильный подъемник; 8 – очиститель-выравниватель; 9 – "распечатываемая" деталь; 10 – мобильная платформа с деталью.

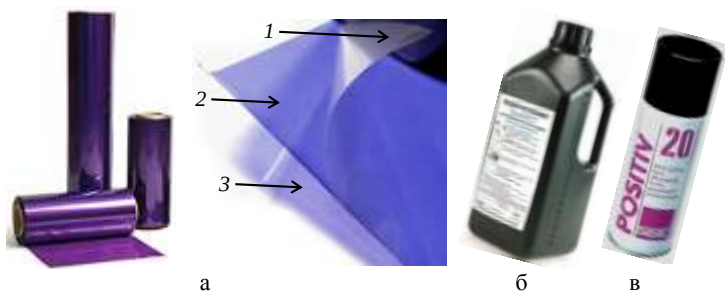


Рис. 3 – Разновидности фотополимеров:
а – сухой пленочный (1 – полиэтиленовая матовая пленка; 2 – сухой фотополимер (фоторезист); 3 – лавсановая прозрачная пленка); б – жидкий фотополимер; в – фоточувствительный лак-спрей.

После окончания обработки одного сечения детали над всей поверхностью проходит очиститель-выравниватель 8 и убирает слой неиспользованного фотополимера. Далее необходимо "нарастить" следующий слой детали, для чего мобильная платформа вместе со сформированной частью детали 10 полностью погружается в ванну с фотополимером, тем самым подготавливая основу для следующего слоя (сечения) детали. Таким образом, поверх предыдущего слоя лазерным лучом "рисуются" следующий слой, пока трехмерная модель не будет воспроизведена полностью.

SLA-технология на сегодняшний день является одной из наиболее распространенных в мировой промышленности, что связано с рядом ее преимуществ. Прежде всего, стереолитография обеспечивает высокую точность "печатаемой" детали – порядка 100 мкм; позволяет воспроизвести как мелкие детали сложной формы, так и довольно крупные; обеспечивает низкую шероховатость поверхности. Недостатками стереолитографии являются, прежде всего, высокие цены установок и расходных материалов – цена такого 3D-принтера может достигать до сотен тысяч долларов. Также SLA-технология нуждается в применении т.н. поддерживающих структур для частей модели, "висящих" в воздухе (рис. 4), которые подлежат удалению после окончания печати. Процесс удаления требует определенной квалификации, кропотливости – неосторожность может привести к разрушению модели. Также ограничением применения стереолитографии является то, что данная технология позволяет получать детали только из фотополимеров.

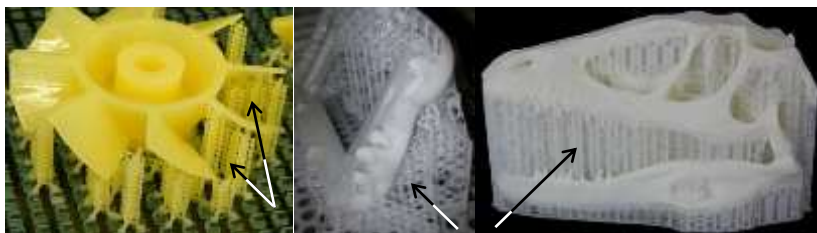


Рис. 4 – Поддерживающие структуры моделей при печати по SLA-технологии.

Следующая технология 3D-печати называется **селективным лазерным спеканием** (selective laser sintering или SLS-технология).

Теоретическая суть технологии была разработана в конце 80-х годов XX века в Техасском университете (г. Остин) и запатентована в 1989 г. выпускником данного университета Карлом Декардом (Carl Deckard, рис. 5) [10]. Спустя несколько лет принцип SLS-технологии был реализован американской компанией DTM Corporation (ее основа-

телями и стали Карл Декард с Джо Бимэнном), которая и начала применять данную технологию на практике. Однако в конце 90-х годов после ряда перепродаж контрольный пакет акций DTM Corporation был приобретен Ч. Халлом и все той же компанией 3D Systems!



Рис. 5 – Проф. Джо Бимэн (Joe Beaman) демонстрирует трехмерные пластиковые модели, выполненные по SLS-технологии на установке, разработанной тогда еще студентом Карлом Декардом (слева) (фото 1987 г.).

В SLS-технологии, также как и в SLA-технологии, применяется источник лазерного излучения, однако в качестве рабочего материала применяется не жидкий фотополимер, а мелкодисперсный сыпучий порошок легкоплавкого пластика (далее – пластиковый порошок).

Схема, описывающая процесс 3D-печати с помощью SLS-технологии показана на рис. 6, а ее суть заключается в следующем.

Начальный этап работы схемы аналогичен SLA-технологии. Точно также лазерный луч 4 проходит не по всему слою пластикового порошка 6, который подается в рабочую зону дозированно в небольшом количестве и тонким равномерным слоем с помощью выравнивающего валика 7, а попадает лишь на участки детали 5, которые подлежат запеканию, формируя, тем самым, одно из сечений будущей модели. Пластиковый порошок 6 поступает из специальных картриджей 8, размещенных на установке с двух сторон, с помощью поршней 9. Пластиковый порошок непосредственно в рабочей зоне нагревается практически до температуры плавления, а во избежание его воспламенения и окисления в рабочую камеру 10 подается защитный газ, в качестве которого, как правило, применяется азот. На следующем этапе мощный лазерный луч установки формирует на поверхности разрабатываемого объекта текущий слой толщиной около 50-100 мкм. Под тепловым воздействием лазерного луча предварительно разогретый пластиковый порошок нагревается уже выше температуры плавления и спекается.

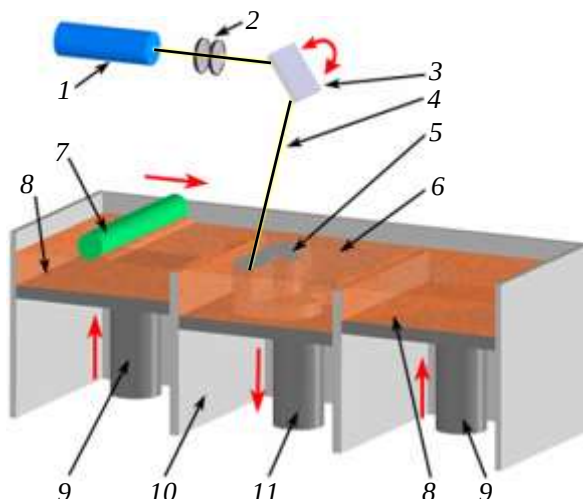


Рис. 6 – Схема процесса 3D-печати по SLS-технологии:

1 – лазер; 2 – фокусирующие линзы; 3 – вращающееся зеркало; 4 – лазерный луч; 5 – спеклённая часть детали, обработанная лазером; 6 – пластиковый порошок; 7 – выравнивающий валик, подающий порошок в рабочую зону; 8 – емкости (картриджи) с пластиковым порошком; 9 – поршни подачи пластикового порошка из картриджей; 10 – рабочая камера с деталью; 11 – поршень, приводящий в движение платформу с установленной на ней деталью.

Затем мобильная платформа 10 с деталью 5 с помощью поршня 11 опускается на толщину одного слоя и в рабочую зону валиком 7 вновь поступает равномерный слой пластикового порошка 6 и операция повторяется снова.

Хотя наружная поверхность моделей, изготовленных по SLS-технологии, и получается несколько пористой, но все-таки лазерное спекание обеспечивает хорошее качество деталей наряду с их высокой механической прочностью. Лазерное спекание дает возможность "распечатывать" модели даже с подвижными частями (например, с петлевыми соединениями, кнопками и т.п.). В отличие от SLA-технологии, модели, "напечатанные" по SLS-технологии не нуждаются в поддерживающих структурах за счет заполнения свободного пространства порошком. Поскольку пластиковый порошок находится в рабочей камере при температуре чуть меньше температуры плавления, то энергия применяемой для спекания лазерной установки может быть существенно снижена (но все равно SLS-технология требует использования лазера большей мощности по сравнению с SLA-технологией). Есть у SLS-технологии и недостатки.

Установка для лазерного спекания достаточно сложная и дорогая (цена может достигать до 400 тыс. USD), а скорость 3D-печати невелика – составляет всего лишь несколько сантиметров (в высоту) в час (также необходимы временные затраты на нагревание установки и ее остывание). Также относительным недостатком технологии лазерного спекания является то, что в качестве материала моделей могут быть использованы лишь порошковые полимеры, литейный воск, нейлон и т.п.

Однако несколько лет назад по данному недостатку был нанесен первый удар в лице разновидности SLS-технологии – т.н. **DMLS-технологии** (direct metal laser sintering или "прямое лазерное спекание металла"), о которой нужно сказать несколько слов. Были успешно разработаны специальные материалы (металлические порошки с размером частиц порядка 20 мкм), позволяющие напрямую "распечатывать" детали из металла [11]! В качестве порошка были использованы микрочастицы стали, сверху покрытые слоем связующего пластика. Спекание пластика происходит как при SLS-технологии, только после "распечатанная" модель дополнительно обжигается в печи. При термообработке пластик выгорает, а освободившиеся пустоты заполняются бронзой. В результате получается деталь, состоящая на 60 % из стали и на 40 % из бронзы. Такой сплав по своим механическим характеристикам превосходит алюминий и приближается к нержавеющей стали. Таким образом, данная технология позволяет получать полноценные металлические детали практически любой формы. Кроме того, относительно недавно был успешно разработан аналогичный материал с керамической "сердцевинкой", из которого можно изготавливать модели, устойчивые к высоким температурам и агрессивным средам.

Следующая технология 3D-печати с использованием лазера называется **ламинирование** или послойное формирование моделей из листового материала (laminated object manufacturing или LOM-технология). Технология была разработана нашим соотечественником, одесситом Михаилом Фейгеном (Michael Feygin, рис. 7) [6, 12], выпускником механического факультета Московского технологического института пищевой промышленности, эмигрировавшим в 1978 г. в возрасте 25 лет в США. Он основал в 1985 г. компанию Helisys Inc., которая и занялась выпуском 3D-принтеров (рис. 7), работающих по LOM-технологии. Однако в 2000 г. из-за финансовых трудностей компания прекратила свое существование, а на теоретической основе разработанных ею технологий на сегодняшний день выпускает свое оборудование ее преемник – компания Cubic Technologies (США) [13] и ряд других производителей, например, компания Solido3D (США) [14].



Michael Feygin



LOM-1015Plus



LOM-2030H

Рис. 7 – Основатель LOM-технологии Михаил Фейген с двумя ведущими моделями 3D-принтеров компании Cubic Technologies.

Схема, описывающая процесс 3D-печати с помощью LOM-технологии показана на рис. 8, а ее суть заключается в следующем.

Начальный этап работы схемы аналогичен рассмотренным выше технологиям. Отличием является то, что в LOM-технологии в качестве рабочего материала применяется не фотополимер, не порошок, а тончайшая пленка 9 (толщина от 76 до 254 мкм). В 3D-принтер (рис. 9), в зависимости от его модификации, предварительно загружаются либо тонкие листы пленки с нанесенным на поверхность клеящим покрытием, которое активизируется при нагреве, либо смотанный рулон пленки целиком 10 с дополнительными емкостями, в которых заправлено специальное клеящее вещество.

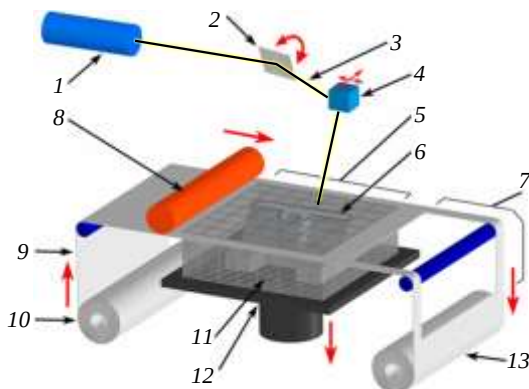


Рис. 8 – Схема процесса 3D-печати по LOM-технологии:

- 1 – лазер; 2 – вращающееся зеркало; 3 – лазерный луч; 4 – подвижная оптическая головка; 5 – текущий обрабатываемый слой (рабочая зона); 6 – обрабатываемый контур детали; 7 – предыдущий обработанный слой; 8 – мобильный нагревательный валик; 9 – тонкая пленка; 10 – картридж с рулоном пленки; 11 – слоистая структура детали и заготовки; 12 – мобильная платформа; 13 – отработанный рулон пленки после печати.

Пройдя через выравнивающие валики, слой пленки поступает в рабочую зону 5, где лазерным лучом 3 (либо механическим способом – режущим инструментом) вырезается как контур 6 детали, так и разрезается на отдельные фрагменты (сетка на рис. 8) текущий обрабатываемый слой. После резки по всей поверхности рабочей зоны перемещается валик 8, разогревая клеящее вещество и сдавливая текущий слой пленки с предыдущим, формируя тем самым, шаг за шагом, послойно склеенную трехмерную модель детали. Отходы пленки 13 в виде рулона с прорезанными обработанными слоями 7 сматываются на конечном этапе печати. Для послойного вертикального перемещения детали платформа 12 выполнена мобильной.

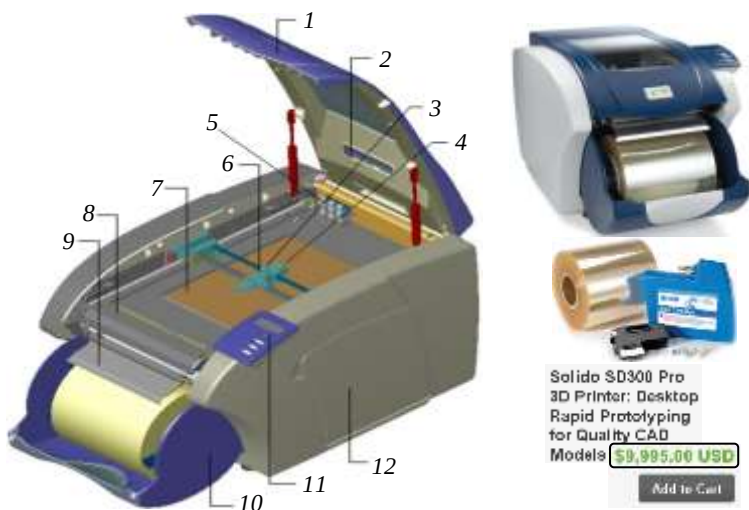


Рис. 9 – 3D-принтер SD300 Pro компании Solido3D [15], работающий по LOM-технологии:

1 – верхняя крышка; 2 – нагреватель, встроенный в верхнюю крышку; 3 – отрезной (cut) нож; 4 – обрезной (trim) нож; 5 – емкости с антиклеющим веществом (antigluе pen); 6 – координатная головка; 7 – рабочая платформа; 8 – блок разглаживания (ironing unit); 9 – устройство подачи пленки; 10 – крышка отсека для рулона пленки (8 кг); 11 – панель управления; 12 – крышка отсека для картриджей с клеящим веществом (glue cartridge).

В первых моделях 3D-принтеров, работающих по LOM-технологии, применялась специальная бумага с нанесенным слоем клеящего вещества. Теоретически, с помощью данной технологии можно нарезать и тонкий пластик, керамику и даже металлическую

фольгу. Так как в "распечатываемой" модели отсутствуют пустоты (они заполнены нарезанными "кубиками", см. рис. 8), LOM-технология также не нуждается в поддерживающих структурах, однако, процесс удаления лишнего материала с модели требует специального инструмента (рис. 10) и в ряде случаев, при сложных конструкциях деталей, может вызывать определенные затруднения.

Данная технология на первый взгляд выглядит неудобной в практическом применении, однако позволяет получать детали довольно сложной формы (рис. 11) даже в домашних условиях. Только вот цена... (рис. 9). Также процесс печати моделей по LOM-технологии занимает относительно длительное время (рис. 12) [16].

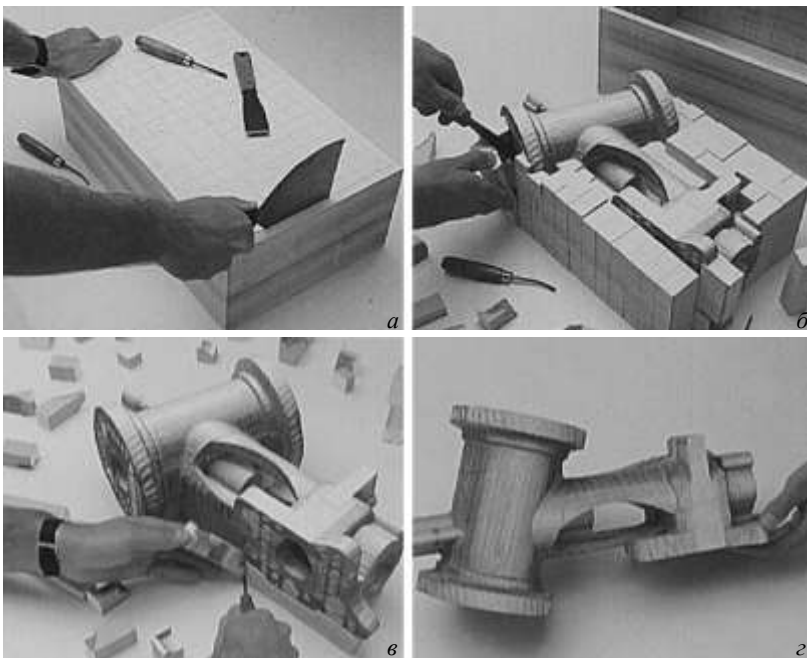


Рис. 10 – Процесс извлечения детали, выполненной по LOM-технологии:
а – "распечатанный" блок снимается с платформы LOM-принтера; *б* – с модели снимается "опалубка" для освобождения "кубиков" нарезанного материала;
в – "кубики" отделяются от поверхности модели с помощью специального инструмента; *г* – поверхность модели может быть дополнительно шлифована, отполирована или окрашена.

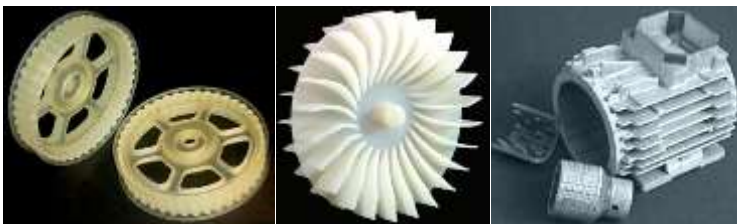


Рис. 11 – Пример деталей, выполненных по LOM-технологии.



Гидромотор
Размеры: 310×215×225 мм
LOM-принтер: 1015Plus
Построение: 37 часов



Корпус двигателя
Размеры: 787×610×280 мм
LOM-принтер: 2030H
Построение: 150 часов

Рис. 12 – Затраты времени для печати моделей по LOM-технологии.

LOM-технология, помимо создания прототипов деталей, применяется для 3D-печати моделей для последующего литья в землю, центробежного литья, литья в постоянные и гипсовые формы, создания оснастки для вакуумной формовки, отличием которых является высокая точность (порядка 100 мкм). Поскольку ни во время печати, ни после затвердевания листовые заготовки не подвергаются ни физическим, ни химическим, ни фазовым изменениям, готовые модели не подвержены короблению, в них отсутствуют внутренние остаточные механические напряжения или другие деформации.

Среди недостатков LOM-технологии можно выделить такие.

Мощность лазера подлежит точной настройке, так как лазерный луч должен прорезать только текущий обрабатываемый слой и не проникать по глубине в ранее обработанные слои. Недостаточный контроль мощности лазерного луча может привести к искажению модели.

Изготовление моделей, содержащих тонкостенные элементы конструкции, затруднено по причине их невысокой механической прочности. При извлечении такой модели из блока (рис. 10) необходимо точно знать, где подобные элементы расположены во избежание их повреждения.

Относительно невысокая механическая прочность моделей, что связано с самим принципом LOM-технологии – по сути модели состо-

ят из склеенных между собой слоев пленки. Поэтому целостность модели полностью зависит от адгезионной прочности используемого клея, и возможны случаи, когда "распечатанные" модели могут не справиться с высокой механической нагрузкой, которая может потребоваться от прототипов при предварительных испытаниях.

Наиболее трудоемкой операцией LOM-технологии является процесс отделения модели от блока (рис. 10), который выполняется специальным инструментом и является трудоемким и довольно утомительным. Рабочий, выполняющий данную операцию, должен обладать определенными навыками и соблюдать осторожность при извлечении модели, чтобы не повредить ее.

Таким образом, рассмотрены три наиболее распространенных способа 3D-печати на основе лазерных технологий (SLA, SLS, LOM), которые в основном применяются в различных областях промышленности в виде довольно габаритных, дорогостоящих установок и не подходят для использования в качестве настольных принтеров для дома и офиса. Лишь LOM-технология реализована для "домашних" 3D-принтеров, однако их стоимость заставляет лишь развести руками... Но не стоит отчаиваться! Любой человек на Украине, имеющий в кармане 900 USD и больше, может приобрести компактный настольный 3D-принтер [17, 18], но работающий уже по *струйной технологии* 3D-печати. Как и в обычной двумерной печати, струйные 3D-принтеры пытаются не отставать от лазерных и в трехмерной области.

Самой распространенной струйной технологией 3D-печати является **моделирование методом наплавления** (fused deposition modeling или FDM-технология). Принцип данного способа 3D-печати был разработан в 1988 г. американским инженером Скоттом Крапом (S. Scott Crump, рис. 13) и запатентован им и его женой Лизой (Lisa H. Crump) в 1989 г.



Рис. 13 – Сооснователь FDM-технологии Скотт Крамп.

Идея FDM-технологии пришла в голову С. Крампу в 1988 г. при очень забавных обстоятельствах [19] – как любящий отец он решил сделать своими руками игрушечного лягушонка для своей младшей дочери с помощью обычного клеевого пистолета (glue gun), но "зарядив" его стержнем из смеси полиэтилена и свечного воска. Идея заключалась в постепенном наращивании и создании моделей слой за слоем. С. Крамп "загорелся" данной идеей: он придумал способ автоматизации процесса, посвятил бесчисленные выходные на усовершенствование конструкции, а также потратил 10000 USD на необходимое оборудование... Какая жена выдержит такую одержимость мужа? И Лиза Крамп поставила условие – либо превратить эту одержимость в бизнес, либо поставить точку на этой затее! Так поблагодарим же С. Крампа за то, что он выбрал первый вариант! Так в 1989 г. и появилась на свет компания Stratasys Inc. [20], основателями которой и стали Скотт и Лиза Крамп.

Схема, описывающая процесс 3D-печати с помощью FDM-технологии показана на рис. 14, а ее суть заключается в следующем.

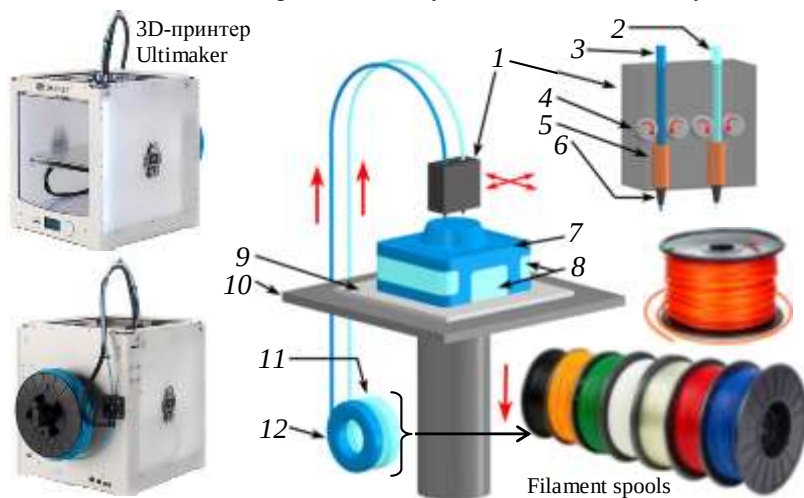


Рис. 14 – Схема процесса 3D-печати по FDM-технологии:

1 – экструзионная головка; 2 – полимерная нить (filament) для создания поддерживающих структур; 3 – полимерная нить для построения модели; 4 – вращающиеся приводные ролики; 5 – ожигители (liquefiers); 6 – сопла экструзионной головки; 7 – "тело" модели; 8 – элементы поддерживающих структур; 9 – пенопластовая подложка; 10 – мобильная платформа; 11 – бобина (filament spool) с полимерной нитью для создания поддерживающих структур; 12 – бобина с полимерной нитью для построения модели.

Материалом для 3D-печати по FDM-технологии в основном служат термопластики (акрилонитрилбутадиенстирол (ABS), полилактид (PLA) и другие), поставляемые в виде тонких (1,27; 1,75; 3 мм) нитей 2 и 3, смотанных в бобины 11 и 12, массой от 1 кг. В установках могут одновременно применяться несколько бобин (например, разных цветов) в зависимости от модели принтера, но, как правило, минимальное количество бобин равно двум – первая (поз. 12 на рис. 14) служит для построения модели, вторая же (поз. 11 на рис. 14) – для создания поддерживающих структур (см. рис. 4). Нити с бобин с помощью роликов 4 поступают в мобильную экструзионную головку 1, где нагревательные элементы ожижителей 5 разогревают их до полужидкого состояния. Через сопла экструзионной головки 6 полужидкий материал выдавливается тонкой (250-965 мкм, в зависимости от модели) струйкой на пенопластовую подложку 9, расположенную на мобильной платформе 10, имеющую возможность перемещаться в вертикальном направлении. Так как температура окружающего воздуха вблизи сопла намного меньше температуры плавления выходящего из экструзионной головки 6 материала, то он практически мгновенно затвердевает. Таким образом, перемещаясь в горизонтальной плоскости, экструзионная головка "печатает" текущий слой модели 7 и поддерживающих структур 8. Когда слой полностью завершен, платформа 10 опускается вниз на расстояние порядка 100-300 мкм (величина называется "толщина слоя" и может задаваться в принтере вручную) и процесс повторяется снова для следующего слоя.

FDM-технология обладает целым рядом преимуществ: во-первых, данная технология дает возможность получать модели сразу же из нужного материала – различных видов пластика. Исследования показали [6], что пластиковые детали, полученные на 3D-принтере по FDM-технологии, по своим механическим характеристикам на 85 % соответствуют механическим характеристикам деталей, полученных традиционным способом – литьем. Во-вторых, FDM-технология является практически безотходной – дополнительный расход материала необходим лишь для создания поддерживающих структур. Следует отметить, что компанией Stratasys для деталей, полученных по "своей" FDM-технологии, был разработан специальный способ по быстрому и "безболезненному" удалению поддерживающих структур. Это уже не медленный, ручной, как для LOM-технологии, способ удаления, а полностью автоматизированный процесс – WaterWorks Soluble Support System [21]). Он протекает в специальных очистительных станциях (CleanStation [22], рис. 15), в которых за счет циркуляции теплой воды

с небольшим содержанием специального моющего раствора (также возможно дополнительное использование ультразвуковых колебаний) происходит растворение материала поддерживающих структур без нарушения целостности самой модели. В-третьих, материал для 3D-печати по FDM-технологии поставляется в удобном технологичном виде – бобины, которые довольно просты и легки как в применении, так и в замене на новые.



Рис. 15 – Очистительные станции для удаления поддерживающих структур.

Среди недостатков FDM-технологии следует отметить такие.

Невысокая точность моделей, что связано с формой используемого "печатающего" материала – нить, диаметром 1,27 мм и более.

Относительно невысокая скорость печати, вызванная вязкостью материала и ограниченной скоростью его выхода из экструзионной головки, необходимостью заполнить всю площадь поперечного сечения каждого слоя материалами модели и поддерживающих структур.

Усадка материала, связанная с сутью FDM-технологии – быстрое охлаждение выдавленного из экструзионной головки материала. Это обуславливает также возникновение в модели напряжений. Усадка и напряжение могут вызвать "перекос", искажение модели. Это явление нередко встречается у моделей, напечатанных по FDM-технологии, и его, как правило, проблематично спрогнозировать и устранить. Лишь приобретя определенные навыки и опыт, удастся избежать подобных искажений, варьируя параметры процесса печати.

Но, несмотря на все недостатки, именно FDM-технология получила самое широкое распространение в бытовых 3D-принтерах. Одна-

ко деловая жилка четы Крамп проявилась и в том, что кроме получения патента на сам принцип печати по FDM-технологии, была также защищена и сама аббревиатура "FDM", являющаяся запатентованной торговой маркой компании Stratasys. В результате, обладая, по сути дела, монопольным правом на 3D-печать данным способом, цена принтеров компании Stratasys, а также необходимых расходных материалов, продолжает держаться на довольно высоком уровне.

Дабы законным путем "обойти" патент и иметь возможность выпускать 3D-принтеры по "схожей" технологии, но за меньшую цену, в марте 2005 г. на базе университета в английском городе Бат (University of Bath) был создан проект RepRap [23, 24] (от англ. – Replicating Rapid Prototyper), который возглавил преподаватель механического факультета этого университета, математик Эдриан Боуер (Adrian Bowyer). Цель проекта RepRap – разработка и предоставление на свободное, всеобщее обозрение конструкций дешевых устройств для быстрого прототипирования, которые были бы доступны не только для людей в развитых, но и в развивающихся странах, на что уже летом 2005 г. было получено финансирование от Совета по инженерным и естественнонаучным исследованиям Великобритании (остается лишь позавидовать оперативности решения финансовых вопросов – неужели у них нет Казначейства?!). Члены проекта RepRap решили ввести собственный термин, описывающий технологию, по которой работают разрабатываемые ими 3D-принтеры – **моделирование плавленной нитью** (fused filament fabrication или FFF-технология). По своей сути и принципу FFF-технология – это та же описанная выше FDM-технология, но позволяющая решить юридические стороны вопроса. Уже 13 сентября 2006 г. на суд общественности был представлен первый прототип RepRap 0.2, успешно напечатавший первую собственную деталь. На сегодняшний день проект RepRap представлен тремя 3D-принтерами [24], в т.ч. и одной моделью, позволяющей печатать в цвете (рис. 16).

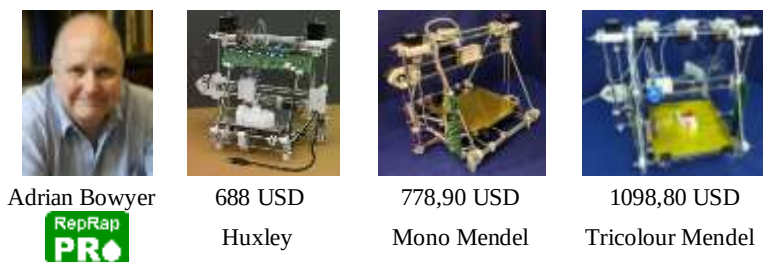


Рис. 16 – Основатель проекта RepRap Эдриан Боуер с линейкой 3D-принтеров, печатающих по FFF-технологии.

Для сравнения, самый дешевый "бюджетный" 3D-принтер серии Mojo (рис. 17) компании Stratasys, печатающий по FDM-технологии, в комплекте с программным обеспечением, набором материалов, системой очистки от поддерживающих структур WaveWash (аналог описанной ранее системы WaterWorks) самим производителем рекомендовано продавать по розничной цене 9900 USD, что на целых 8401 USD (!!!) дороже, чем в среднем все существующие марки настольных 3D-принтеров [25]! Ох уж эта чета Крамп!



Рис. 17 – "Бюджетный" комплект с 3D-принтером Mojo компании Stratasys.

В 2012 г. проведен социологический опрос [26], касающийся использования 3D-принтеров, одним из вопросов которого был следующий: "3D-принтером какого производства Вы пользуетесь?". Результаты опроса показаны на рис. 18.

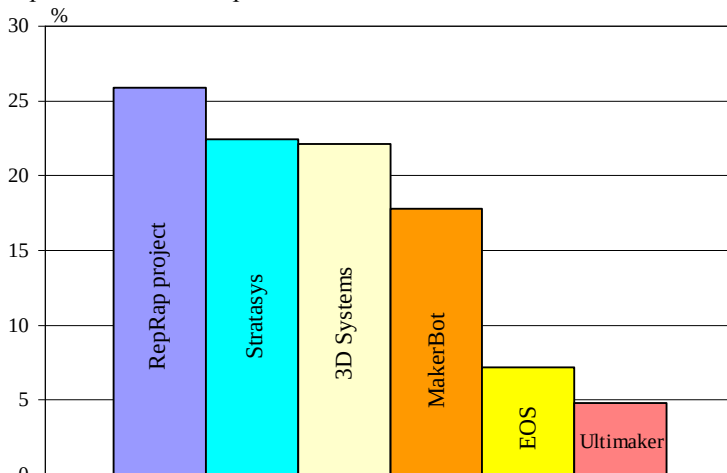


Рис. 18 – Результаты соцопроса по вопросу выбора производителя 3D-принтеров.

Здесь нужно учесть, что, компании Stratasys принадлежат 3D-принтеры таких торговых марок, как Objet и Dimension, а компании 3D Systems – Z Corporation и Bits from Bytes. Необходимо также отметить положительную тенденцию, которая наметилась за последние годы. В среде небольших групп людей, как правило, друзей, выпускников одного института, объединенных общим увлечением – быстрым прототипированием – зарождаются вначале "кружки", в которых просто ради интересного времяпровождения, методом проб и ошибок проектируются свои собственные конструкции 3D-принтеров, которые в случае упорной работы, терпения, настойчивости, ну и удачи, конечно же, могут составить (и таки составляют!) реальную конкуренцию крупным компаниям на рынке технологий быстрого прототипирования. Такими примерами могут послужить упомянутые на рис. 18 компании MakerBot (США) [27] и Ultimaker (Нидерланды) [28], причем некоторые из основателей этих компаний (рис. 19, 20) в свое время были питомцами Эдриана Боуiera и участниками проекта RepRap.



Рис. 19 – Основатели компании MakerBot (слева направо) со своим "детищем": Adam Mayer, Zach Smith и Bre Pettis.



Рис. 20 – Основатели компании Ultimaker (слева направо) со своим "детищем": Siert Wijnia, Martijn Elserman и Erik de Bruijn.

Интересно, что в июне 2013 г. чета Крамп "добралась" и до компании MakerBot – было объявлено [29] о ее приобретении компанией Stratasys за 403 млн USD! Отныне компания MakerBot является дочерней компанией Stratasys, акцентирующей на выпуске "домашних" настольных 3D-принтеров для широкого круга потребителей, а сама компания Stratasys – безусловным мировым лидером на рынке технологий для быстрого прототипирования. А ведь все начиналось с безобидного детского игрушечного лягушонка для младшей дочери...

В заключение хотелось бы привести несколько примеров использования 3D-принтеров в социальных проектах и направлениях, при виде которых на глаза просто наворачиваются слезы, и которые подтверждают, что все в нашей жизни возможно и настоящие чудеса случаются (рис. 21) [27, 30, 31] – достаточно просто взглянуть на счастливые лица и улыбки ребят!!!



Рис. 21 – 3D-печать – шанс на нормальную жизнь.

Выводы.

1. Рассмотрен чрезвычайно актуальный для машиностроительной области Украины вопрос, касающийся существующих на сегодняшний день на мировом рынке основных технологий по быстрому прототипированию сложных трехмерных объектов.

2. Подробно проанализированы принципы 3D-печати по SLA, SLS, LOM и FDM технологиям, рассмотрены их особенности применения, исторические факты возникновения и развития, технологические возможности и ограничения, преимущества и недостатки.

3. Показана перспективность и полезность от применения технологий по быстрому прототипированию как в учебном процессе, так и в научно-исследовательских целях.

Список литературы: 1. Электронный ресурс / Режим доступа: rw.utc.com/Home. 2. Афанасьев К. 3D-принтеры [Электронный ресурс] / Режим доступа: www.3dnews.ru/160001. 3. Интегрированные генеративные технологии : учеб. пособие [для студ. выс. учеб. заведений] / А.И. Грабченко, Ю.Н. Внуков, В.Л. Доброскок, Л.И. Пупань, В.А. Фадеев; под ред. А.И. Грабченко. – Харьков : НТУ "ХПИ", 2011. – 416 с. 4. Todd Grimm. User's Guide to Rapid Prototyping. – Society of Manufacturing Engineers (US), 2004. – 404 p. 5. Hague R.J.M., Reeves P.E. Rapid Prototyping, Tooling and Manufacturing. – iSmithers Rapra Publishing, 2000. – 118 p. 6. Chua C.K., Leong K.F., Lim C.S. Rapid Prototyping: Principles and Applications. Second Edition. – World Scientific Publishing, 2003. – 420 p. 7. Электронный ресурс / Режим доступа: stratasys.com/3d-printers/technology/polyjet-technology. 8. Принцип действия трёхмерной печати. Зрительное восприятие, инновации и технологии: составляющие процесса струйной трёхмерной печати. Электронный ресурс / Режим доступа: zcorp.com/documents/821_3D%20Printing%20White%20Paper%202009%20HiRes_RU.pdf. 9. Электронный ресурс / Режим доступа: 3dsystems.com. 10. Электронный ресурс / Режим доступа: me.utexas.edu/news/2012/0612_selective_laser_sintering.php. 11. Электронный ресурс / Режим доступа: 3dsystems.com/3d-printers/production/phenix-rxi#.urpxudfppkqr. 12. Электронный ресурс / Режим доступа: plus.google.com/104304548478539727387/about. 13. Электронный ресурс / Режим доступа: cubictechnologies.com/Helisys.htm. 14. Электронный ресурс / Режим доступа: solido3d.com. 15. Электронный ресурс / Режим доступа: mcad-cafe.com/PDFs/MCADCafe_SolidoReview_090209_Final_web.pdf. 16. Электронный ресурс / Режим доступа: portal.tpu.ru:7777/SHARED/k/KSO/Files/TomskCAD/LOM/LOM.htm. 17. Электронный ресурс / Режим доступа: 3dprinter.org.ua/products/3d-printers/?orderby=price. 18. Электронный ресурс / Режим доступа: 3dfactory.com.ua/3d-printer-up-mini. 19. Электронный ресурс / Режим доступа:

fundinguniverse.com/company-histories/stratasys-inc-history. 20. Электронный ресурс / Режим доступа: www.stratasys.com/3d-printers/technology/fdm-technology. 21. Электронный ресурс / Режим доступа: solver.ru/engl/preproduct/stratasys.htm. 22. Электронный ресурс / Режим доступа: cleanstation-srs.com. 23. Электронный ресурс / Режим доступа: reprap.org/wiki/RepRap. 24. Электронный ресурс / Режим доступа: reprappro.com. 25. Электронный ресурс / Режим доступа: desktop-3d-printers.findthebest.com/q/28/12373/How-much-is-the-Stratasys-Mojo-3D-printer. 26. Электронный ресурс / Режим доступа: surveys.peerproduction.net/2012/05/manufacturing-in-motion. 27. Электронный ресурс / Режим доступа: makerbot.com. 28. Электронный ресурс / Режим доступа: ultimaker.com. 29. Электронный ресурс / Режим доступа: techcrunch.com/2013/06/19. 30. Отец распечатал на 3D-принтере протез для сына. 05 ноября 2013. [Электронный ресурс] / Режим доступа: podrobnosti.ua/video/cybernetics/2013/11/05/940420.html. 31. Электронный ресурс / Режим доступа: robohand.blogspot.com.

Поступила в редколлегию 03.12.2013

УДК 67.05

Технологии быстрого прототипирования – от детской игрушки до мирового господства / Гречко А.М. // Вісник НТУ "ХПИ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПИ", 2013. – № 65 (1038). – С. 14-36. Бібліогр.: 31 назв.

У статті проведено аналітичний огляд однієї з найбільш перспективних на сьогоднішній день технологій у машинобудуванні – швидке прототипування складних тривимірних моделей.

Ключові слова: 3D-технологія, швидке прототипування, 3D-друк, технологія машинобудування.

The article provides an analytical overview of one of the most advanced to date technologies in mechanical engineering – rapid prototyping of complex three-dimensional models.

Keywords: 3D-technology, rapid prototyping, RP-technology, mechanical engineering.



Гречко Александр Михайлович, кандидат технических наук, доцент кафедры электрических аппаратов НТУ "ХПИ". Защитил диссертацию кандидата технических наук в 2009 г. в НТУ "ХПИ" по специальности "Электрические машины и аппараты". Научные интересы связаны с проблемой усовершенствования электромагнитных механизмов электрических аппаратов, новыми технологиями в машиностроении.

А.Г. СЕРЕДА, канд. техн. наук, доц.; НТУ "ХПИ"

И.С. ВАРШАМОВА, ассистент; НТУ "ХПИ"

В.В. ЛИТВИНЕНКО, ассистент; НТУ "ХПИ"

ПОВЫШЕНИЕ УРОВНЯ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ КОРАБЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Обоснована актуальность повышения чувствительности аппаратов релейной защиты к токам удаленных коротких замыканий при реализации дальнего резервирования отказов защит. Показано, как цифровая обработка сигналов от датчиков тока позволяет расширить возможности реализуемых защит в расцепителях автоматических выключателей. Подтверждена эффективность извлечения дополнительной информации о процессах в электрической цепи по степени искажения фазных токов в переходном режиме. Доказана возможность идентификации вида броска тока в переходном режиме возникновения возмущения электрической цепи. Предложен критерий блокировки срабатывания автоматических выключателей при прямом пуске асинхронных электродвигателей. Дано научно-техническое обоснование применения комплексного критерия идентификации пускового тока асинхронного электродвигателя. Приведен алгоритм функционирования микропроцессорного устройства защиты при блокировании срабатывания автоматических выключателей для обеспечения гарантированного пуска и разгона асинхронного электродвигателя.

Ключевые слова: дальнейшее резервирование, микропроцессорный расцепитель, релейная защита.

Введение. Защита распределительных сетей электроснабжения кораблей от токов коротких замыканий (КЗ) преимущественно обеспечивается автоматическими выключателями (АВ) с различной выдержкой времени на отключение на различных ступенях селективной защиты. Существующий ступенчато-временной принцип селективной защиты формирует некорректную времятоковую характеристику всей системы защиты с точки зрения обеспечения пожарной безопасности [1], [2]. При ступенчато-временной селективной защите, чем ближе к источнику питания расположен выключатель и больше ожидаемый ток КЗ, тем больше принудительная выдержка времени на отключение. При этом существенно возрастает термическое и динамическое действие аварийного тока на элементы электрической цепи, а также энергия электрической дуги. Это затрудняет обеспечение высокого уровня пожарной безопасности электроустановок. Более совершенной будет защитная характеристика, когда при переходе на более высокую ступень

пень защиты, ближе к источнику питания время срабатывания не увеличивается [2], [3].

Кроме того, принудительная задержка срабатывания выключателя вышестоящего к источнику питания по сравнению со временем отключения тока КЗ выключателем нижестоящим к потребителю в системе селективной защиты существенно усложняет возможность повышения надежности защиты за счет дальнего резервирования отказов [4]. Суть дальнего резервирования (ДР) заключается в том, что при отказе любого выключателя резервная защита аварийного участка электрической цепи осуществляется выключателем, расположенным на более высокой ступени защиты [5]. Надежность защиты участка электрической сети определяется вероятностью безотказной работы выключателя, защищающего этот участок. Гарантированное производителем значение 0,95 вероятности безотказной работы АВ при выполнении защитных функций не соответствует современным требованиям. Поэтому важным направлением повышения надежности является переход к защите не одним, а системой из двух аппаратов. Согласно [6], при вероятности безотказной работы каждого аппарата, равной 0,95, вероятность безотказной работы системы защиты из двух таких аппаратов составляет 0,9975. Таким образом, при реализации ДР вероятность отказов защиты существенно снижается. Чтобы обеспечить такой высокий показатель надежности, необходимо обеспечить близкие времена срабатывания верхней и нижней ступеней защиты. Это значит, что на всех ступенях защиты выключатели должны иметь одинаковую чувствительность к токам КЗ, особенно удаленным. При ступенчато-временном принципе селективной защиты время срабатывания селективного выключателя, установленного ближе к источнику, может быть недопустимо большим, чем время срабатывания выключателя, установленного ближе к нагрузке. В связи с этим требование высокого быстродействия селективной защиты необходимой для повышения уровня пожарной безопасности электроустановок и надежности токовой защиты трудно обеспечить.

Актуальность. Недостатки существующей координации аппаратов релейной защиты показаны на примере системы защиты судовой электроустановки, приведенной на рис. 1 [7], [8]. Источником электроэнергии 0,4 кВ является основной G_1 и резервный G_2 генераторы. При питании электроустановки от генератора G_1 защита имеет четыре ступени селективности. В распределительном щите РЩ на IV оконечной ступени защиты установлены выключатели $QF_{4,1}$ - $QF_{4,2}$ типа АК-50Б. Для выключателей АК-50Б на номинальный рабочий ток $I_{r4} = (8-25)A$

ток предельной коммутационной способности составляет $I_{cu} = 11 \text{ кА}$ [9], поэтому за выключателем III ступени установлен реактор, ограничивающий ток КЗ до $I_{cc} = 10 \text{ кА}$. Время отключения указанного тока выключателем АК-50Б составляет примерно 20 мс. На III ступени расположен выключатель QF_{3,1} типа А3724СМ на номинальный ток $I_{r3} = 250 \text{ А}$ с принудительной выдержкой времени на отключение $t_{sd3} = 0,1 \text{ с}$. В главном распределительном щите ГРЩ на II ступени установлен выключатель QF_{2,2} типа А3794СМ на номинальный ток $I_{r2} = 630 \text{ А}$ с выдержкой времени на отключение $t_{sd2} = 0,25 \text{ с}$. Выключатели I ступени QF_{1,1} и QF_{1,2} типа ВА55-43 на номинальный рабочий ток $I_{r1} = 1250 \text{ А}$ имеют выдержку времени срабатывания $t_{sd1} = 0,4 \text{ с}$. Предельный ток селективности выключателей ВА55-43 равен $I_{cu} = 33,5 \text{ кА}$ [10], поэтому для обеспечения полной селективности [11] ниже его установлен реактор, ограничивающий ток КЗ до $I_{cc} = 30 \text{ кА}$.

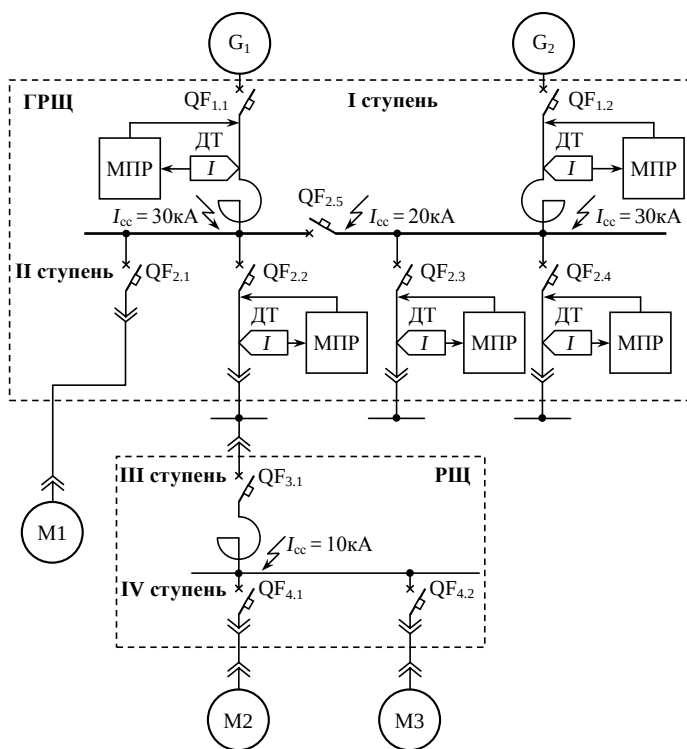


Рис. 1. Фрагмент схемы судовой системы электроснабжения.

Чтобы выключатель $QF_{1.1}$ первой степени защиты с рабочим током 1250 А имел достаточную чувствительность для резервной защиты участка электрической цепи, защищаемой нижестоящим выключателем $QF_{2.2}$, токовые уставки их микропроцессорных расцепителей (МПП) в зоне токов КЗ должны быть равны $I_{sd1} = I_{sd2}$. Однако, выбранная по условию пуска электродвигателя М1 уставка $I_{sd1} = 3750$ А выключателя $QF_{1.1}$ оказывается больше уставки $I_{sd2} = 1260$ А выключателя $QF_{2.2}$. Очевидно, что в диапазоне токов КЗ от 1260 А до 3750 А вышестоящий выключатель $QF_{1.1}$ не может защитить участок электрической цепи за выключателем $QF_{2.2}$ в случае отказа последнего. Аналогичная ситуация имеет место на других ступенях защиты. На рис. 2 обозначены зоны токов КЗ, в которых вышестоящий выключатель не выполняет функцию резервной защиты участка цепи, когда нижестоящий выключатель отказал.

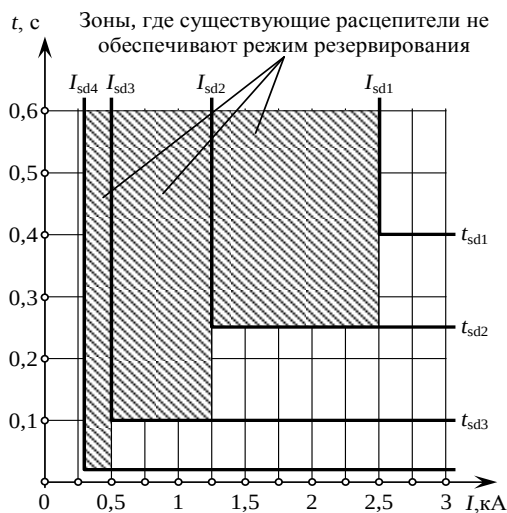


Рис. 2. Карта селективности четырехступенчатой защиты

Цель статьи: повышение чувствительности аппаратов релейной защиты к токам КЗ путем использования дополнительных критериев идентификации аварийных режимов с целью обеспечения селективности и дальнего резервирования отказов защит.

Материалы исследования. Повысить чувствительность аппаратов защиты к токам КЗ можно путем отстройки от пусковых токов мощных асинхронных электродвигателей (ЭД), значения которых мо-

гут быть больше значений токов удаленных КЗ. Для этого необходимо быстро идентифицировать вид тока возмущения. Является ли он током удаленного КЗ в конце защищаемой линии, или пусковым током ЭД соседнего фидера. В алгоритме срабатывания расцепителя АВ необходимо к существующей токовой уставке I_{sd} зоны КЗ, которая выбирается по величине тока прямого пуска ЭД, ввести дополнительную уставку I'_{sd} , меньшую I_{sd} и согласованную с ожидаемым током удаленного КЗ. Меньшая уставка должна быть заблокирована при пусках ЭД и активирована при удаленных КЗ.

Ударный ток КЗ в любой фазе будет наибольшим, если замыкание произойдет в момент, когда фазная электродвижущая сила (ЭДС) проходит через нуль. Для этого случая изменение фазного тока во времени t описывается уравнением:

$$i = I_m \left[\sin(\omega t + \psi - \varphi) + \sin(\varphi - \psi) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \right], \quad (1)$$

где I_m – амплитудное значение периодической составляющей тока КЗ в фазе; $\varphi = \arctg(\omega L/R)$ – угол сдвига, на который периодическая составляющая фазного тока отстает от фазной ЭДС; L , R – индуктивность и активное сопротивление фазы; $\tau = \frac{L}{R} = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\omega} = \frac{\sin \varphi}{\omega \cos \varphi}$ – постоянная времени электрической цепи; $\omega = 2\pi f$ – угловая частота сети; f – рабочая частота сети; ψ – момент возникновения КЗ.

Характер изменения во времени тока в любой фазе электрической цепи существенно зависит от такого случайного фактора, как момент возникновения тока возмущения, характеризующегося углом ψ . Поэтому по мгновенным значениям тока $i_{j(a,b,c)}$ в каждой фазе a , b , c , полученным от датчиков тока ДТ (рис. 1), анализировать характер переходного процесса возмущения электрической цепи невозможно. Воспользуемся силовой функцией электрической цепи $S(t)$, которая характеризует суммарные электродинамические силы в трехфазной системе токов и представляет собой зависимость от времени суммы квадратов мгновенных значений токов всех трех фаз [12]:

$$S(t) = \sum_{a,b,c} i_j^2 = i_a^2(t) + i_b^2(t) + i_c^2(t), \quad (2)$$

где i_j – мгновенное (дискретное) значение тока; $i_a(t)$, $i_b(t)$, $i_c(t)$ – мгновенные значения токов в фазах a , b , c соответственно:

$$i_a(t) = I_m \left[\sin \left(\omega t + \psi - \varphi + \frac{2\pi}{3} \right) - \sin \left(\psi - \varphi + \frac{2\pi}{3} \right) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \right]; \quad (3)$$

$$i_b(t) = I_m \left[\sin(\omega t + \psi - \varphi) - \sin(\psi - \varphi) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \right]; \quad (4)$$

$$i_c(t) = I_m \left[\sin \left(\omega t + \psi - \varphi - \frac{2\pi}{3} \right) - \sin \left(\psi - \varphi - \frac{2\pi}{3} \right) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \right], \quad (5)$$

ψ – начальный угол ЭДС в фазе b (момент возникновения тока возмущения).

После подстановки уравнений (3)-(5) в (2) и преобразования полученного выражения уравнение для силовой функции принимает следующий вид:

$$S(t) = 3I_{ph}^2 \left[1 - 2e^{-\frac{t}{\tau}} \cos \omega t + e^{-\frac{2t}{\tau}} \right], \quad (6)$$

где I_{ph} – действующее значение периодической составляющей тока.

Из уравнения (6) следует, что характер изменения во времени функции $S(t)$ в переходном режиме возникновения тока возмущения электрической цепи не зависит от угла ψ , но существенно зависит от коэффициента мощности $\cos \varphi$.

На рис. 3 представлено семейство кривых силовой функции построенных по уравнению (6) для случаев трехфазного возмущения электрической цепи с различным $\cos \varphi$, но одинаковым значением I_{ph} , равным 1.

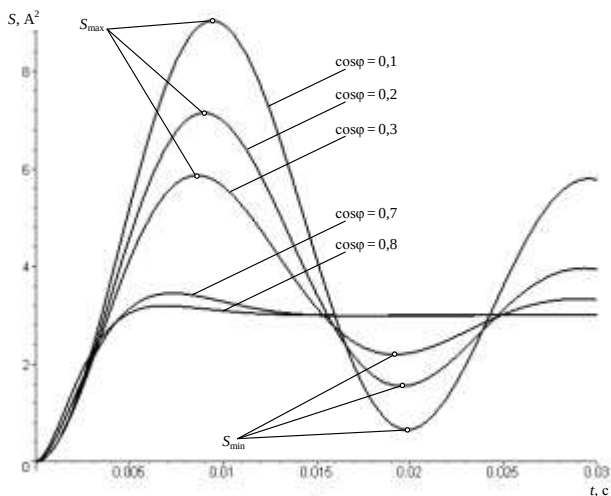


Рис. 3. Изменение силовой функции в переходном режиме возникновения тока возмущения электрической цепи.

Чем меньше $\cos \varphi$ электрической цепи, тем большей величины достигает функция $S(t)$ в первый период переходного режима. Таким образом, путем вычисления в реальном масштабе времени максимального $S_{\max}$ и минимального $S_{\min}$ значений силовой функции в первый период возникновения возмущения электрической цепи можно быстро определить $\cos \varphi$ и идентифицировать вид тока возмущения. В [13] идентификация тока возмущения базируется именно на основе анализа функции $S(t)$.

Селективная защита обеспечивается за счет срабатывания АВ от интегральной уставки Q_{sd} . При этом расчет интегралов $Q_{(a,b,c)}$ квадратов токов возмущения $\Delta i_{j(a,b,c)}^2$ начинается после активации уставки I'_{sd} . Когда электрическая цепь находится под нагрузкой, током возмущения является не полное значение тока в фазе I_{ph} , а приращение тока ΔI_{ph} , определяемое как разница между полным током I_{ph} в фазе, фиксируемым датчиками, и током предыстории I_{pr} , который протекал в электрической цепи (нагрузке) до возникновения тока возмущения:

$$\Delta I_{ph} = I_{ph} - I_{pr} . \quad (7)$$

Расчет величины ΔI_{ph} проводится с использованием функции $S(t)$, характер изменения которой, как уже отмечалось, не зависит от ψ , но существенно зависит от значения $\cos \varphi$ и составляющей ΔI_{ph} . Если

подставить в уравнение (2) мгновенные дискретные значения токов возмущения $\Delta i_{j(a,b,c)}$, достаточно быстро можно определить величину ΔI_{ph} . Поэтому в состав комплексного критерия срабатывания защиты вводится именно значение тока возмущения ΔI_{ph} , которое позволяет за счет возможности отстроиться от токов перегрузки, существенно повысить чувствительность защиты к удаленным КЗ, а быстрая идентификация вида тока возмущения электрической цепи (удаленное КЗ или пуск ЭД) позволяет увеличить быстродействие защиты на более высоких ступенях.

Измерение мгновенных значений тока $i_{j(a,b,c)}$ в каждой фазе электрической цепи и их аналого-цифровое преобразование осуществляется через равные промежутки времени Δt . Со сдвигом временного интервала на Δt осуществляют расчет мгновенных значений токов возмущения $\Delta i_{j(a,b,c)}$:

$$\Delta i_{j(a,b,c)} = i_{j(a,b,c)T_1} - i_{j(a,b,c)T_0}, \quad (8)$$

где i_{jT_1} – мгновенные значения тока в каждой фазе электрической цепи в течение текущего периода T_1 изменения тока; i_{jT_0} – мгновенные значения тока в предыдущий период изменения тока T_0 (ток предыстории).

Расчет интегралов $Q_{(a,b,c)}$ квадратов мгновенных значений приращения тока в каждой фазе осуществляется по формуле:

$$Q_{(a,b,c)} = \int_0^T \Delta i_{j(a,b,c)}^2 dt = \sum_0^T \Delta i_{j(a,b,c)}^2 \Delta t, \quad (9)$$

Значение $Q_{(a,b,c)}$ сравнивается со значением интегральной уставки Q_{sd} расцепителя АВ. Момент времени, соответствующий $Q_{(a,b,c)} = Q_{sd}$, используют для формирования выдержки времени срабатывания интегральной селективной защиты t_Q . Расчет интегралов $Q_{(a,b,c)}$ начинается в момент времени, когда мгновенное значение тока возмущения $\Delta i_{j(a,b,c)}$ в одной из фаз станет больше величины $\sqrt{2}I'_{sd}$, где I'_{sd} – значение токовой уставки, выбранной с учетом защиты от удаленных КЗ. Если ток возмущения трехфазный, то суммарный интеграл всех трех фаз за время периода изменения тока T равен:

$$Q_{\Sigma} = \sum_0^T Q_{(a,b,c)}. \quad (10)$$

Путем деления величины Q_{Σ} на максимальное значение S_{max} суммы квадратов мгновенных значений токов $\Delta i_{j(a,b,c)}$ (2) определяется время:

$$t_{sm} = Q_{\Sigma} / S_{\max} . \quad (11)$$

По величине t_{sm} определяют величину коэффициента мощности $\cos \varphi$ электрической цепи. Время t_{sm} – это время, в течение которого эквивалентное термическое воздействие токов возмущения, сумма квадратов которых равна $S_{\max}$, равно фактическому термическому воздействию токов возмущения за время периода изменения тока. То есть это время эквивалентного термического воздействия на сеть максимальной суммы квадратов токов всех трех фаз, которая зависит от величины $\cos \varphi$.

Математически время t_{sm} определяется из уравнения:

$$\int_0^T S [\Delta i_{(a,b,c)}^2(t)] dt = \int_0^{t_{sm}} S_{\max} dt . \quad (12)$$

При $\cos \varphi = 0,3$, характерном для запуска ЭД и $\cos \varphi = 0,7$, характерном для удаленного КЗ, значения t_{sm} существенно отличаются друг от друга (12,2 и 16,4 мс соответственно), что свидетельствует о весо-мости времени t_{sm} для надежного определения величины $\cos \varphi$ [13]. Таким образом, путем анализа функции $S(t)$ в первый период возникновения тока возмущения можно быстро идентифицировать вид сверхтока и отстроиться от пусковых токов ЭД.

Зависимость коэффициента мощности $\cos \varphi$ от времени t_{sm} используется также для определения величины ΔI_{ph} из выражения:

$$S_{\max} = 3 \Delta I_{ph}^2 \cdot K_y^2 . \quad (13)$$

где K_y – ударный коэффициент тока КЗ в электрической цепи, значение которого определяют по известной зависимости $K_y = f(L/R)$ [14].

Откуда:

$$\Delta I_{ph} = \sqrt{\frac{S_{\max}}{3 \cdot K_y}} . \quad (14)$$

Необходимая отстройка от такого возможного фактора, как токи перегрузки в соседних фидерах, увеличивающие фазный ток защитного аппарата, осуществляется благодаря быстрому непрерывному мониторингу величины ΔI_{ph} , когда значение ΔI_{ph} в памяти микропроцессора обновляются каждый период T изменения тока. Ток нагрузки совокупности потребителей подключенных к защищаемой линии не может быть больше рабочего тока линии I_r . Значит ток возмущения электрической цепи, обусловленный подключением одного потребителя, также не может быть больше I_r . Поскольку вероятность одновременного подключения к линии нескольких потребителей в промежуток времени

$T = 20$ мс чрезвычайно мала [6], то предложенная защита в зоне токов КЗ не реагирует на токи перегрузки. То есть использование в качестве одного из критериев срабатывания защиты тока ΔI_{ph} исключает отрицательное влияние на точность защиты заранее существующих токов нагрузки. Определение величины $\cos \varphi$, а затем и значения ΔI_{ph} основывается на анализе интегралов (9). Поэтому расчет интегралов $Q_{(a,b,c)}$ осуществляют раньше определения величины ΔI_{ph} , именно в момент времени, когда мгновенное значение тока $\Delta i_{j(a,b,c)}$ в одной из фаз становится больше величины $\sqrt{2}I'_{sd}$. Это позволяет обеспечить время срабатывания интегральной селективной защиты менее 20 мс, то есть повысить быстродействие защиты по сравнению с [15].

Использование комплексного критерия срабатывания защиты, объединяющего несколько параметров, позволяет упростить алгоритм работы микропроцессорного расцепителя при реализации быстродействующей токовой защиты с высокой чувствительностью к токам удаленных КЗ, так как расчет интегралов (9) одновременно используется как для реализации интегральной селективной защиты, так и для защиты от удаленных КЗ. Таким образом, МПР автоматического выключателя формирует более совершенную времятоковую характеристику защиты, приведенную на рис. 4.

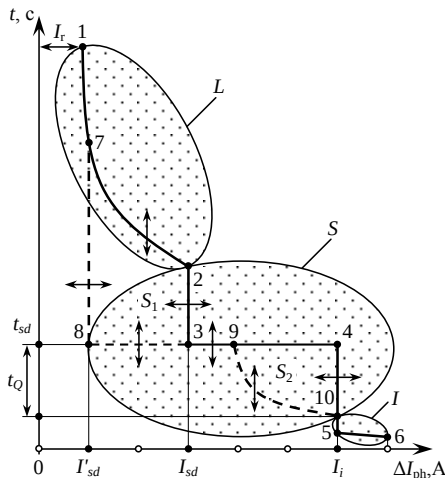


Рис. 4. Времятоковая защитная характеристика микропроцессорного расцепителя после модернизации: L – защита зоны перегрузки S – защита зоны КЗ; S_1 – защита удаленного КЗ; S_2 – интегральная селективная защита; I – защита "отсечки".

Участок 1-2 (рис. 4) формируется так же, как и в существующих защитах от токов перегрузки – время срабатывания t обратно зависит от величины полного тока в фазе. Переход от зоны перегрузки L в зону КЗ S в зависимости от вида тока возбуждения, может происходить либо по линии 2-3, если $\Delta I_{ph} > I_{sd}$, либо по ломаной 2-7-8 при удаленном КЗ или дальнем резервировании. Если ток возбуждения ΔI_{ph} идентифицирован как пусковой ЭД, то токовая уставка защиты увеличивается от величины I'_{sd} до значения I_{sd} . Отрезок характеристики от тока, равного уставке удаленного КЗ $\Delta I_{ph} = I'_{sd}$, до тока, равного уставке "отсечки" $\Delta I_{ph} = I_i$, формируется временным и интегральным модулями. Оба модуля параллельно формируют время срабатывания селективной защиты по двум различным зависимостям. Время срабатывания, формируемое временным модулем $t_{sd} = \text{const}$, не зависит от тока, а время срабатывания t_Q , формируемое интегральным модулем, определяется величиной интеграла $Q_{(a,b,c)}$, то есть находится в обратной зависимости от квадрата величины ΔI_{ph} . Благодаря параллельному формированию времен t_{sd} и t_Q при сравнительно небольших токах время срабатывания ограничивается фиксированной выдержкой времени t_{sd} (участки 8-4, или 9-4), а при больших значениях ΔI_{ph} (участок 9-10), время срабатывания защиты уменьшается вследствие того, что интегральная уставка Q_{sd} , обеспечивающая селективность, учитывает особенности работы нижестоящего выключателя. В результате интеграл отключения электрической цепи вышестоящим выключателем по интегральной уставке Q_{sd} оказывается меньше интеграла отключения этой же электрической цепи нижестоящим выключателем с фиксированной выдержкой времени на отключение t_{sd} . То есть при наличии у выключателей уставки Q_{sd} , величина которой выбирается в два раза больше, чем интеграл отключения аппарата, стоящего ниже, время срабатывания селективной защиты получается значительно меньше. Уменьшение времени срабатывания селективной защиты характеризуется участком 4-10. В случае превышения током возбуждения ΔI_{ph} значения I_i защита срабатывает мгновенно – участок 10-5-6. Таким образом, предложенная защита обеспечивает высокую чувствительность к токам удаленных КЗ и режим ДР.

Повышение быстродействия селективной защиты при токах КЗ достигается применением вместо ступенчато-временного метода, более быстродействующего, интегрального способа. При этом селективная работа выключателей разных ступеней обеспечивается не только путем соответствующего выбора временных задержек на отключение t_{sd} , а и различными значениями интеграла Джоуля ожидаемого тока

КЗ. Интегральный способ селективной защиты используют в предохранителях. Однако, использование предохранителей не позволяет обеспечить требуемую координацию по следующим причинам:

- зоны L и S защитной характеристики предохранителя взаимосвязаны, поэтому достичь минимального сдвига защитных характеристик в зоне КЗ двух последовательно включенных предохранителей не удается;
- значения интегралов плавления предохранителя нестабильны из-за конструктивных, технологических и эксплуатационных разбросов параметров предохранителей;
- на интеграл плавления вышестоящего предохранителя существенно влияют токи "предыстории", когда ток КЗ в одном из фидеров, который защищается нижестоящим предохранителем, может быть сравним с суммарным током нагрузки соседних фидеров.

Указанные недостатки при реализации интегральной селективной защиты могут быть устранены путем применения АВ с МПР. Для обеспечения высокого быстродействия интегральной защиты необходимо быстро отстроиться от апериодической составляющей тока КЗ, поскольку токовые уставки аппаратов защиты задаются действующим значением периодической составляющей тока. Действующее значение периодической составляющей тока КЗ обычно определяют относительно медленным методом интегрирования мгновенного значения тока за время не менее трех периодов (60 мс для рабочей частоты 50 Гц). Быстрое определение, в течение одного первого периода после возникновения КЗ (20 мс) указанного параметра возможно с помощью функции $S(t)$. Исходя из формулы (6), выражение для действующего значения периодической составляющей тока возмущения ΔI_{ph} при симметричном трехфазном КЗ имеет вид:

$$\Delta I_{ph} = \frac{\sqrt{S(t)}}{3 \left[1 - 2e^{-\frac{t}{T}} \cos \omega t + e^{-\frac{2t}{T}} \right]}. \quad (15)$$

Применение уравнения (15) для определения действующего значения периодической составляющей тока и использования интеграла Q_{Σ} как дополнительного критерия формирования интегральной уставки Q_{sd} позволяет существенно повысить быстродействие защиты именно при граничных токах КЗ. Это связано с тем, что время срабатывания в данном случае обратно пропорционален квадрату тока, а ток, пропускаемый через выключатели высших ступеней защиты по

разным причинам всегда больше, чем ток через нижестоящие выключатели.

Действие интегральной селективной защиты показано на примере электроустановки (рис. 1). На рис. 5, а показаны последовательно включенные выключатели с дополнительными токовыми уставками I'_{sd} , на которых выполнена селективная защита одной ветви данной электроустановки. Линия 1 (рис. 5, б) соответствует карте ступенчато-временной селективности, а линия 2 соответствует интегральной селективной защите. Очевидно, что время срабатывания защиты при максимальном для электроустановки значении тока КЗ, равном 30 кА, при интегральной селективности можно снизить на время t_Q (рис. 4) с 0,4 с до 0,1 мс (рис. 5, б). При этом существенно снижаются термическая и электродинамическая нагрузки на элементы электроустановки при КЗ.

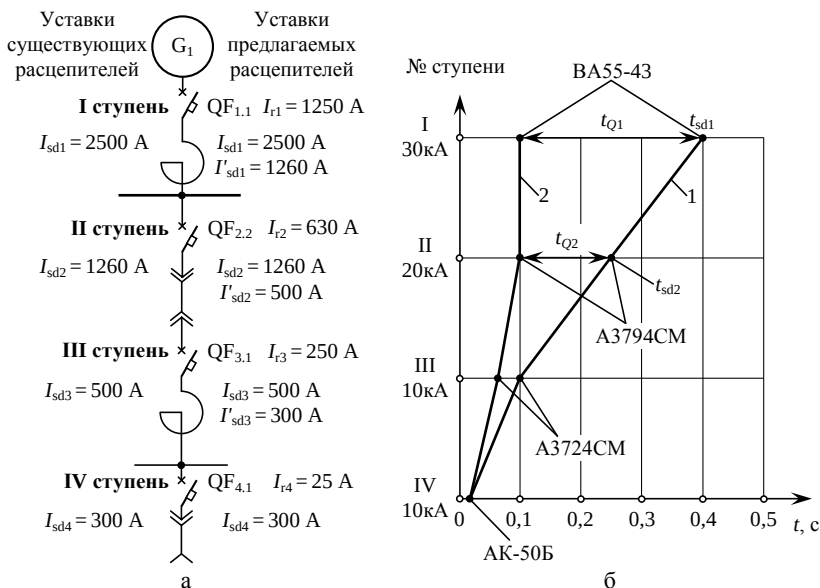


Рис. 5. Повышение быстродействия селективной защиты

Модернизацию существующих судовых электроустановок за счет реализации предложенных технических решений можно провести без каких-либо изменений структуры системы электроснабжения, что существенно снижает временные и финансовые затраты такой модерни-

зации. Замена подлежат только аналоговые полупроводниковые расцепители селективных выключателей I-III ступеней защиты на микропроцессорные блоки с интегральной уставкой Q_{sd} .

Выводы.

1. Улучшение защитных свойств противоаварийной автоматики судовых систем электроснабжения достигается путем дальнего резервирования отказов аппаратов релейной защиты.

2. Времятоковые защитные характеристики существующих автоматических выключателей в зоне токов КЗ формируют некорректную с технической точки зрения карту селективной защиты судовых электроустановок, когда на более высоких степенях защиты наряду с увеличением ожидаемого тока КЗ увеличивается и время срабатывания защиты.

3. Повышение чувствительности к токам удаленного КЗ обеспечивается за счет надежной идентификации тока возмущения путем использования комплексного критерия срабатывания защиты, объединяющего величину $\cos\varphi$ и значение тока возмущения электрической цепи ΔI_{ph} .

4. Более совершенная, с элементами адаптивности, времятоковая защитная характеристика микропроцессорного расцепителя автоматического выключателя позволяет существенно улучшить качество релейной защиты судовых систем электроснабжения путем удаленного резервирования отказов защит и существенно повысить уровень пожарной безопасности.

Список литературы: 1. Chowdhury, B.H., Baravc S. (2006), "Creating Cascading Failure Scenarios in Interconnected Power Systems", *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 18-22 June 2006, Montreal, Canada. ISBN 1-4244-0493-2. 2. Кобозев А.С. Модернизация защиты электроустановок собственных нужд АЭС напряжением 0,4 кВ / А.С. Кобозев, А.Г. Середя, Л.Б. Жорняк, В.В. Моргул // *Электротехника та електроенергетика*. – Запоріжжя: ЗНТУ. – 2012. – № 2. – С. 66-72. ISSN 1607-6761. 3. Tan, J. C., Crossley, P.A., D. Kirschen, Goody, J. and Downes, J.A. (2000), "An Expert System for the Back-up Protection of a Transmission Network", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 15, iss. 2, pp. 508-514. ISSN 0885-8977. 4. Garlapati, S., Hua Lin, Sambamoorthy, S., Shukla, S.K., Thorp, J.S. (2010), "Agent Based Supervision of Zone 3 Relays to Prevent Hidden Failure Based Tripping", *IEEE International Conference on Smart Grid Communications*, 4-6 October 2010, PP. 256-261. ISBN 978-1-4244-6510-1. 5. Chang, C.S., Feng, T., Khambadkone, A.M., Kumar, S. (2000), "Remote short-circuit current determination in DC railway systems using wavelet transform", *Electric Power Applications IEE Proceedings*, Vol. 147, iss. 6, pp. 520-526. ISSN 1350-2352. 6. Вентцель Е.С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения:

учеб. пособие / *Е.С. Венцель, Л.А. Овчаров*. – 5-е изд., стер. – М.: КНОРУС, 2013. – 480 с. – ISBN 978-5-406-00565-1. **7. Баранов А.П.** Судовые автоматизированные электроэнергетические системы. Учебник для вузов. / 2-е издание, переработанное и дополненное. – СПб: Судостроение, 2005. – 528 с. – ISBN 5-7355-0680-3. **8. Богомолов В.С.** Судовые электроэнергетические системы и их эксплуатация [Текст]: учеб. для студ. и курсантов, обуч. в сред. проф. учеб. заведениях системы рыбохозяйств. комплекса по спец. "Эксплуатация транспорт. электрооборудования и автоматики", "Эксплуатация транспорт. энергет. установок" / *В.С. Богомолов*. – М.: Мир, 2006. – 320 с. – ISBN 5-03-003767-5. **9.** ТУ 16-522.136-78. Выключатели автоматические серии АК50Б. Технические условия. Утв. ВПО "Союзэлектроаппарат". Гр. Е71. ДК 29.120.40. Режим доступа: <http://www.etm.ru/files/ak50b.pdf>. Дата звернення 03.11.2013. **10.** Выключатели автоматические типа ВА53-43 и ВА55-43. Руководство по эксплуатации ГЖИК.641353.014РЭ. Курск: КЭАЗ, 2010. – 33 с. **11.** Руководство по устройству электроустановок. Технические решения "Шнейдер Электрик" / Техническая коллекция Schneider Electric. – 2009. – 469 с. **12. Райнин В.Е.** Совершенствование защитных характеристик автоматических выключателей низкого напряжения / *В.Е. Райнин, А.С. Кобозев* // Электротехника. – № 2. – 2009. – С. 44-51. **13.** Пат. 101084 України МПК (2013.01) H02H 3/08 (2006.01), H02H 7/00, H01H 73/00. Спосіб швидкодіючого максимального струмового захисту з високою чутливістю до струмів віддалених коротких замикань / *О.С. Кобозев, О.Г. Серета*. – № a201109057; заявл. 19.07.2011; опубл. 25.02.2013, Бюл. №4. – 6 с. **14.** ГОСТ 28249-93. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ. **15.** Пат. 73195 України МПК Н 02 Н 3/08 Спосіб максимального струмового захисту електроустановок / *Г.М. Гапоненко, Ю.М. Агафонов, С.Г. Рассомахін, В.М. Шлокін*. – №2003010807. Заявлено 30.01.2003; Опубл. 15.06.2005, Бюл. № 6. – 6 с.

Поступила в редколлегию 20.12.2013

УДК 621.316.925.1: 621.316.578.1

Повышение уровня пожарной безопасности корабельных систем электроснабжения / Серета А.Г., Варшамова И.С., Литвиненко В.В. // Вісник НТУ "ХПИ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2013. – № 65 (1038). – С. 37-52. Бібліогр.: 15 назв.

Обґрунтована актуальність підвищення чутливості апаратів релейного захисту до струмів віддалених коротких замикань при реалізації віддаленого резервування відмов захистів. Показано, як цифрова обробка сигналів від датчиків струму дозволяє розширити можливості захистів, що реалізуються в розчіплювачах автоматичних вимикачів. Підтверджено ефективність отримання додаткової інформації про процеси в електричному колі за ступенем спотворення фазних струмів в перехідному режимі. Доведена можливість іденти-

фікації виду різкого зростання струму в перехідному режимі виникнення збурення електричного кола. Запропоновано критерій блокування спрацьовування автоматичних вимикачів при прямому пуску асинхронних електродвигунів. Надано науково-технічне обґрунтування застосування комплексного критерію ідентифікації пускового струму асинхронного електродвигуна. Наведено алгоритм функціонування мікропроцесорного пристрою захисту при блокуванні спрацьовування автоматичних вимикачів для забезпечення гарантованого пуску і розгону асинхронного електродвигуна.

Ключові слова: віддалене резервування, мікропроцесорний розчіплювач, релейний захист

The relay protection devices sensitivity increasing topicality for remote short-circuit currents in the failure protection remote backup implementation is grounded. How the digital processing of signals from the current sensors allows to empower of circuit breakers trip units protective ability is shown. Effectiveness to extract more information about the processes in the electrical circuit according to the distortion degree of phase currents during the transitional mode is confirmed. The fast increase current type identification possibility in a transient mode of disturbance electrical circuits proved. The circuit breakers operation blocking criterion for induction motors direct start is proposed. Scientific and technical justification for the complex criterion application of induction motor starting current identification is given. The algorithm of the microprocessor protection devices operation while circuit breakers blocking operation to the guaranteed start-up and acceleration induction motor ensure is given.

Keywords: remote backup, microprocessor trip, relay protection

А.А. ЧЕПЕЛЮК, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ"

**АНАЛИЗ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ РЕЛЕ
НАПРЯЖЕНИЯ С ФИКСИРОВАННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ
СРАБАТЫВАНИЯ И АВТОМАТИЧЕСКИМ ПОВТОРНЫМ
ВКЛЮЧЕНИЕМ ДЛЯ ЗАЩИТЫ БЫТОВЫХ
ОДНОФАЗНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ОТ НЕДОПУСТИМЫХ
ОТКЛОНЕНИЙ НАПРЯЖЕНИЯ В ПИТАЮЩЕЙ СЕТИ**

Проведен анализ функциональных особенностей реле напряжения с фиксированными параметрами срабатывания и автоматическим повторным включением для защиты бытовых однофазных потребителей электрической энергии от недопустимых отклонений напряжения в питающей сети.

Ключевые слова: реле контроля напряжения, бытовое электрическое оборудование, защита от перенапряжения и провалов напряжения, автоматическое повторное включение.

Введение. Для защиты бытовых однофазных потребителей электрической энергии от недопустимых отклонений напряжения в питающей сети на уровне конечного потребителя (потребителей) на электротехническом рынке Украины предлагается достаточно широкий спектр технических средств защиты. Часть из указанных средств защиты (стабилизаторы напряжения и источники бесперебойного питания) позволяет нормализовать напряжение на нагрузке в случае недопустимых отклонений напряжения в питающей сети. Другая часть из указанных средств защиты представляет собой аппараты защиты от недопустимых отклонений напряжения в питающей сети, которые осуществляют защиту путем отключения конечного потребителя (его нагрузки в виде бытовых, осветительных и др. электроприборов) от питающей сети с недопустимым отклонением напряжения, сохраняя тем самым дальнейшую работоспособность указанных электроприборов. Такие аппараты, на сегодняшний день, являются достаточно эффективным средством защиты бытовых однофазных потребителей электрической энергии от недопустимых отклонений напряжения в однофазной питающей сети на уровне конечного потребителя особенно в случае аварий, вызванных обрывом (отгоранием) PEN-проводников в распределительной трехфазной сети с глухозаземленной нейтралью от которой запитываются однофазные потребители (анализ причин и последствий таких аварий проведен в [1, 2]).

Среди аппаратов индивидуальной защиты бытовых однофазных потребителей электрической энергии от недопустимых отклонений напряжения в питающей сети на электротехнических рынках Украины и России достаточно широко представлены реле напряжения с автоматическим повторным включением (АПВ) с фиксированными порогами срабатывания по напряжению и временем задержки включения, заложенными в конструкциях указанных реле на стадии их производства [3-9].

Такие реле рекомендуется устанавливать на вводе в квартиру, за аппаратом защиты от сверхтоков (токи короткого замыкания и перегрузки), а также они могут устанавливаться в отдельных групповых линиях, питающих наиболее чувствительные к недопустимым отклонениям напряжения бытовые электроприемники (холодильники, стиральные машины, посудомоечные машины, телевизоры и др.).

В технических каталогах производителей эти реле встречаются под названиями: "реле напряжения", "автоматические реле напряжения", "реле контроля напряжения".

Указанные реле имеют определенный ряд конструктивных и технических особенностей, которыми определяется их функциональность, надежность, область применения и которые, по мнению автора, недостаточно раскрыты в технических описаниях производителей реле и практически полностью отсутствуют в технической и учебной литературе по электрическим аппаратам.

Цель работы – анализ функциональных особенностей реле напряжения с фиксированными параметрами срабатывания и автоматическим повторным включением для защиты бытовых однофазных потребителей электрической энергии от недопустимых отклонений напряжения в питающей сети.

Конструктивные особенности реле напряжения. Конструктивно реле напряжения с фиксированными параметрами срабатывания и автоматическим повторным включением выполнены в не поддерживающих горение корпусах модульного исполнения шириной 3ТЕ из механически прочной и термостойкой пластмассы и монтируются на DIN-рейку. Степень защиты реле – IP20. Номинальное напряжение реле – 220 В (среднеквадратичное значение).

Технически такие реле реализованы, как правило, в виде двухполюсового компаратора с задержкой по включению, который осуществляет контроль напряжения питающей сети (его среднеквадратичного значения – True RMS) и включает нагрузку при установившемся допустимом напряжении питающей сети посредством встроенного элек-

тромагнитного реле. Задержка включения в таких реле – фиксированная и составляет от 1-2 до 2-3 минут. Она необходима для исключения частых повторных включений нагрузок при кратковременных недопустимых скачках напряжения в питающей сети, приводящих к отключению реле, что влечет за собой сокращение ресурса работы таких нагрузок и может привести к выходу их из строя (холодильники и др.). В случае если после подключения нагрузки к реле измеряемое напряжение выходит за пределы пороговых значений напряжений, реле отключает нагрузку от питающей сети.

В настоящее время такие реле предлагаются в двух исполнениях:

– с двухцветной световой индикацией наличия напряжения на входе – рис. 1 (свечение красного светодиода свидетельствует о недопустимом отклонении напряжения в питающей цепи и отключении нагрузки, свечение зеленого светодиода свидетельствует о том, что напряжение питающей сети находится в норме и оно подано через реле на нагрузку);



Рис. 1. Примеры конструктивных исполнений реле напряжения с двухцветной световой индикацией наличия напряжения на входе: а – серия PH [3] (АсКо-УКРЕМ, Украина), б – серия e.vrg.pro [4] (E-NEXT Украина), в – серия AZM [5] (Ресанта, Россия), г – серии Энергия HDP [6] (Энергия, Россия) и HDP [7] (MEBA Electric, Китай), д – серия 3SL15 [8] (Sassin International Electric, Китай); е – схема подключения реле.

– с дополнительными световыми индикаторами состояния электрической сети (повышенного напряжения, пониженного напряжения, нормального режима, а также индикатором времени задержки) – рис. 2. В таких реле верхний светодиод (красного цвета) загорается при превышении напряжения в питающей сети выше максимально допустимого порога и отключении от сети подключенной через реле нагрузки вследствие недопустимого превышения напряжения в сети; второй сверху светодиод (зеленый) сигнализирует о нормальном напряжении в питающей сети и на нагрузке и светится при подключении нагрузки через реле к питающей сети; третий сверху светодиод (красный) загорается при снижении напряжения в питающей сети ниже минимально допустимого порога и отключении от сети подключенной через реле нагрузки вследствие недопустимого снижения напряжения в сети; нижний светодиод (желтый) сигнализирует об отсчете времени задержки включения нагрузки, подключаемой через реле после нормализации напряжения в питающей сети. Указанные реле являются усовершенствованными моделями реле с двухцветной световой индикацией.



Рис. 2. Примеры конструктивных исполнений реле напряжения с дополнительными световыми индикаторами: а – серия РН-S [3] (AcKo-УКРЕМ, Украина), б – серия e.industrial.vpr [4] (E-NEXT Украина), в – серия Энергия РН [5] (Энергия, Россия), г – серия 3SL15N [9] (Sassin International Electric, Китай).

Два верхних терминала реле на рис. 1-2 – входные (к ним подключается питание: фазный L и нейтральный N проводники), два нижних терминала – выход реле для подключения нагрузки. Коммутация питающей сети в таких реле осуществляется одним контактом встроенного электромагнитного реле, поэтому при их монтаже необходимо следить за правильностью подключения фазного проводника, который должен отключаться от нагрузки при недопустимом отклонении напряжения в питающей сети контактом встроенного электромагнитного реле – рис. 3,е.

Технические характеристики реле, представленных на рис. 1-2 сведены в табл. 1-2.

Пороговые напряжения и токи в табл. 1-2 приведены в виде среднеквадратичных значений (True RMS).

Таблица 1. Технические характеристики реле напряжения на рис. 1

Производитель (торговая марка)	AcКо- УКРЕМ			E-NEXT		Ресанта, Энергия, МЕБА Elec- tric			Sassin International Electric		
Тип реле	РН-20	РН-32	РН-40	e.vpr.pro.25	e.vpr.pro.32	АЗМ-20А, Энергия HDP-20 и HDP-20	АЗМ-32А, Энергия HDP-32 и HDP-32	АЗМ-32А, Энергия HDP-32 и HDP-32	3SL15-20А	3SL15-32А	3SL15-40А
Максимальная мощность нагрузки AC-1, кВт	4,4	6,5	7,4	4,5	6,6	4,4	6,6	8,8	4,4	6,6	8,8
Максимальный ток нагрузки, А	20	28,5	34	25	32	20	32	40	20	32	40
Время задержки включения, мин	1...2			2...3							
Время отклю- чения, с	0,2...0,4			1...6		1...6			нет данных		
Максимальное пороговое напряжение, В	250±2%			260±5 В		265±5 В					
Минимальное пороговое напряжение. В	170±2%			170±5 В							

В виду того, что часть технических данных по указанным реле, доступных из информационных материалов (каталогов производителей и описаний на интернет-сайтах) отличается от технических данных, нанесенных на оболочки самих реле, при наличии таких отличий в табл. 1-2 были включены данные, нанесенные на оболочках реле.

Также следует отметить, что практически во всех доступных информационных материалах по реле отсутствуют данные по их электрической и механической износостойкости.

Таблица 2. Технические характеристики реле напряжения на рис. 2

Производитель (торговая марка)	AcKo- УКРЕМ			E-NEXT				Энергия			Sassin International Electric		
Тип реле	РН-S-20	РН-S-32	РН-S-40	e..industrial.vpr.20	e..industrial.vpr.25	e..industrial.vpr.32	e..industrial.vpr.40	Энергия РН-20	Энергия РН-32	Энергия РН-40	3SL15N-20A	3SL15N-32A	3SL15N-40A
Максимальная мощность нагрузки AC- 1, кВт	4,4	6,5	7,4	4,4	5,3	6,5	7,4	4,4	6,6	8,8	4,4	6,6	8,8
Максималь- ный ток нагрузки, А	20	28,5	34	20	32	28,5	34	20	32	40	20	32	40
Время задерж- ки включения, мин	2-3												
Время отклю- чения, с	0,2...0,4			0,1...0,6				1...6			1...6		
Максимальное пороговое напряжение, В	255±2%			260±5 В				255±5 В			265±5 В		
Минимальное пороговое напряжение, В	180±2%			170±5 В				180±2%			170±5 В		

В процессе анализа технических данных рассматриваемых реле были установлены противоречащие данные в описании одной из важнейших характеристик реле – времени отключения реле, которые существенно затрудняют проведение анализа функциональных особенностей реле.

Так в технических каталогах и в описаниях на интернет-сайтах целого ряда производителей рассматриваемых реле приводится диапазон времени отключения реле 1...6 с (см. выделенные ячейки в табл. 1-2). По мнению автора, указанный интервал времени срабатывания реле 1...6 с является ошибочным (опечаткой), поскольку при таких временах отключения реле при аварийном повышении напряжения в однофазной сети в случае обрыва N-проводника в питающей трехфазной

сети с глухозаземленной нейтралью (напряжение у однофазного потребителя при этом может достигать междуфазного – до 380 В) реле не обеспечит своевременного отключения нагрузки, т.е. не выполнит свою основную защитную функцию, что может привести к выходу из строя защищаемых электроприборов.

Доказательством того, что при таких временах отключения реле не обеспечит свою защитную функцию может служить выдержка из [10], а именно в табл. Д3 ГОСТ 13109-97 [10] указывается, что при коэффициенте временного перенапряжения – $K_{\text{пер}U}=1,47$ допустимая длительность такого временного перенапряжения – $\Delta t_{\text{пер}U}$ составляет до 1 секунды. Для однофазной сети конечного потребителя временное перенапряжение при указанных коэффициенте временного перенапряжения и допустимой длительности такого временного перенапряжения составит: $U_{\text{пер}}=K_{\text{пер}U} \cdot U_{\text{н}}=1,47 \cdot 220=323,4$ В. Таким образом, очевидным является тот факт, что при фиксированном времени срабатывания реле его время отключения с учетом разброса должно быть меньшим одной секунды.

На основании сделанного заключения далее будут проанализированы функциональные особенности реле с диапазонами времени отключения 0,2...0,4 с и 0,1...0,6 с.

Предельно допустимые уровни провалов напряжения и временных перенапряжений в зависимости от их длительности приведены в [10].

Провалом напряжения согласно [10] называют внезапное понижение напряжения в точке электрической сети ниже $0,9U_{\text{ном}}$, за которым следует восстановление напряжения до первоначального или близкого к нему уровня через промежуток времени от 10 мс до нескольких десятков секунд.

Временным перенапряжением согласно [10] называют повышенное напряжение в точке электрической сети выше $1,1U_{\text{ном}}$, продолжительностью более 10 мс считают. Оно характеризуется коэффициентом и длительностью временного перенапряжения. Значения коэффициента временного перенапряжения в точках присоединения электрической сети общего назначения в зависимости от длительности временных перенапряжений не должны превышать значений, указанных в табл. 3.

Таблица 3. Допустимые временные перенапряжения в однофазной сети и их длительность.

Длительность временного перенапряжения $\Delta t_{\text{пер}U}$, с	до 1	до 20	до 60
Коэффициент временного перенапряжения $K_{\text{пер}U}$, о. е	1,47	1,31	1,15
Временные перенапряжения в однофазной сети при $K_{\text{пер}U}$, В	323,4	288,2	253

Функциональные особенности реле напряжения. Анализируя данные по пороговым напряжениям и временам отключения реле из табл. 1-2 и данные по временным перенапряжениям в однофазных сетях с их предельно допустимой длительностью из табл. 3, можно сделать вывод, что при фиксированных временах отключения реле в диапазоне 0,1...0,6 с или 0,2...0,4 с (в зависимости от типа используемого защитного реле) наиболее эффективно обеспечивается защита при временных перенапряжениях в защищаемой сети свыше 320 В. Также следует отметить, что при меньших уровнях временных перенапряжений могут иметь место ложные срабатывания реле (например, согласно табл. 3 временное перенапряжение в 288 В длительностью 10 с может не отключаться, а при наличии защитного реле оно будет отключено за время 0,1-0,6 с или 0,2-0,4 с в зависимости от типа используемого защитного реле).

Также ложные срабатывания могут иметь место и при кратковременных провалах напряжения длительностью более времени отключения реле, но менее предельно допустимого для однофазной сети уровня.

Из-за определенного разброса порогового напряжения в заводских настройках отдельных реле при настройке их максимального порогового напряжения с отклонением в большую сторону они могут оказаться нечувствительны к длительным перенапряжениям в диапазоне (1,15-1,2) $U_{\text{ном}}$ =253-264 В, в то время как указанные длительные перенапряжения могут иметь длительность, превышающую допустимую.

Выводы.

1. В технических описаниях рассмотренных реле встречаются неточности, отсутствуют данные по электрической износостойкости и сроку службы реле, что может поставить под сомнение защитные функции таких реле и не раскрывает в полной мере их функциональных возможностей.

2. Важным достоинством рассмотренных реле является наличие автоматического повторного включения при нормализации входного напряжения.

3. Фиксированные уставки срабатывания реле (пороговые уровни

напряжения и времени отключения), существенно меньшие предельно допустимых уровней отклонения напряжения и допустимой их длительности (особенно при повышенном напряжении), что может приводить к ложным отключениям потребителей при кратковременных отклонениях напряжения в границах предельно допустимых уровней и их длительности, указанных в [10].

4. Наличие в реле фиксированной задержки повторного включения реле (1-3 мин) без возможности принудительного включения нагрузки без выдержки времени при наличии ложных срабатываний реле может вносить определенный дискомфорт потребителям, особенно при частых ложных срабатываниях реле.

Список литературы: 1. *Чепелюк А.А., Хлобыстин А.Л.* О влиянии технического состояния внутридомовых распределительных сетей на электробезопасность бытовых однофазных потребителей электрической энергии // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Зб. наук. праць. Тем. вип.: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2011. – № 60. – С. 46-53. 2. *Чепелюк А.А., Хлобыстин А.Л.* Анализ проблемы защиты бытовых однофазных потребителей от недопустимых отклонений напряжения в питающей сети // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Зб. наук. праць. Тем. вип.: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2012. – № 28. – С. 54-64. 3. Каталог электротехнической продукции электротехнической корпорации АСКО-УКРЕМ 2013 г. (http://www.acko.ua/upload/iblock/bc6/catalogue2013__cd.rar). 4. Каталог низковольтного оборудования электротехнической компании E.NEXT.UKRAINE 2013 г. (<http://www.enext.ua/upload/iblock/bf5/mpbmajaenepqssompsdotsigkj%20ozemuqcvdcfehtjcjauxmkqq.pdf>). 5. <http://www.resanta.ru/production/others/ustrauz/155-azm.html>. 6. <http://енергия.рф/catalog/nva/modulnoe-oborudovanie/ustr-kontrolya/>. 7. <http://www.power-relay-china.com/HDP-Modular-Over-Under-Voltage-Relay.html>. 8. <http://sassin.bossgoo.com/productimage/3sl15-full-automatic-over-voltage-under-voltage-protector-20127.html>. 9. <http://www.sassin.com/en/productdetail.aspx?id=8DEF311D56E0CEB3&type=3619EFA76A56A74F>. 10. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

Поступила в редакцию 15.11.2013

УДК 621.316

Анализ функциональных особенностей реле напряжения с фиксированными параметрами срабатывания и автоматическим повторным

включением для защиты бытовых однофазных потребителей от недопустимых отклонений напряжения в питающей сети / Чепелюк А.А. // Вісник НТУ "ХПИ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПИ", 2013. – № 65 (1038). – С. 53-62. Бібліогр.: 10 назв.

The analysis of the functional characteristics of the voltage relay with fixed parameters of operation and automatic reclosing-eat to protect domestic single-phase electricity consumers from harmful voltage variations in the mains.

Key words: over under voltage relay, household electrical equipment, over-voltage and under-voltage protector, automatic reclosing.

Проведено аналіз функціональних особливостей реле напруги з фіксованими параметрами спрацьовування та автоматичним повторним ввімкненням для захисту побутових однофазних споживачів електричної енергії від недопустимих відхилень напруги в мережі живлення.

Ключові слова: реле контролю напруги, побутове електричне обладнання, захист від перенапруг та провалів напруги, автоматичне повторне ввімкнення.

В.Ф. БОЛЮХ, д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПИ"

С.В. ОЛЕКСЕНКО, аспирант, НТУ "ХПИ"

И.С. ЩУКИН, ООО Фирма "ТЭТРА, Ltd"

ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ И РАСПОЛОЖЕНИЯ ЯКОРЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИНДУКЦИОННО-ДИНАМИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ 3D МОДЕЛИ

Разработана трехмерная математическая модель индукционно-динамического двигателя, учитывающая взаимосвязанные электромагнитные, механические и тепловые процессы. Исследовано влияние формы якоря, расположение и количество крепежных отверстий в круглом якоре, его наклон по отношению к индуктору на силовые показатели двигателя. Проведены экспериментальные исследования электрических и механических процессов в индукционно-динамическом двигателе, которые подтвердили основные расчетные результаты и теоретические положения.

Ключевые слова: индукционно-динамический двигатель, якорь, трехмерная математическая модель, форма якоря, наклон якоря по отношению к индуктору, экспериментальные исследования.

Введение. Индукционно-динамические двигатели (ИДД) широко используются в промышленных системах и научных исследованиях, где необходимы импульсные ударные механические нагрузки при незначительных перемещениях исполнительного элемента, например бойка [1].

Ударные устройства, в которых уже применяются или перспективны ИДД, охватывают различные сферы промышленности. В строительной индустрии применяются различные электромагнитные молоты, вибраторы, перфораторы и устройства для погружения свай. В горно-рудной промышленности используются бутобы различной мощности и разделители пород, в геологоразведке – сейсмоисточники различной возмущающей силы; в машиностроении – молоты с большим диапазоном энергии удара. Ударные устройства применяются в быстродействующей клапанной и коммутационной аппаратуре, в испытательных комплексах для проверки ответственных изделий на ударные нагрузки и др. Для прессования порошков, очистки вагонов, трюмов и иных емкостей от остатков продуктов и налипания материалов и др. применяются различные технологические ударные устройства [2-8].

В ИДД возбуждаемый от емкостного накопителя энергии (ЕНЭ) индуктор в массивном (сплошном) электропроводящем якоре индукци-

© В.Ф. Болух, С.В. Олексенко, И.С. Щукин, 2013

рует ток, обуславливающий возникновение электродинамических усилий (ЭДУ), передаваемых от якоря к исполнительному элементу. Наиболее распространена коаксиальная конфигурация ИДД, при которой индуктор и якорь выполняются в виде идеально круглых дисков, которые расположены строго коаксиально [9]. Однако на практике форма якоря может быть иной, например, прямоугольной, а его расположение не быть строго коаксиальным по отношению к индуктору. Для увеличения жесткости якоря, выполненного в виде тонкого медного диска, к нему крепится стальная силовая пластина. Для взаимного крепления стальной пластины с медным диском применяются винты, что обуславливает выполнение в медном диске крепежных отверстий. Все указанные обстоятельства влияют на распределение индуцированных токов в якоре, а значит и на силовые показатели ИДД.

Однако до настоящего времени в расчетах в основном использовалась 2D математическая модель, которая позволяла рассматривать лишь идеально коаксиальную конфигурацию ИДД [10].

Целью статьи является исследование влияния формы якоря, расположение и количество крепежных отверстий в круглом якоре, его наклон по отношению к индуктору на силовые показатели ИДД с использованием 3D математической модели.

Математическая модель ИДД. Для расчета распределенного по объему медного якоря, к которому присоединенная стальная силовая пластина, индуцированного тока используется уравнение:

$$\sigma \cdot \left(\frac{\partial \bar{A}}{\partial t} - \bar{v} \times \{ \nabla \times \bar{A} \} \right) + \frac{1}{\mu_0} \cdot \nabla \times \left(\frac{1}{\mu_\gamma} \cdot \nabla \times \bar{A} \right) = 0; \quad (1)$$

где σ – электропроводимость якоря; $\bar{A}$ – векторный магнитный потенциал; $\bar{v}$ – скорость движения якоря; μ_0 – магнитная постоянная; μ_γ – относительная магнитная проницаемость силовой пластины.

В многовитковом индукторе плотность тока определяется сторонними источниками:

$$\frac{1}{\mu_0} \cdot \nabla \times (\nabla \times \bar{A}) = \frac{i \cdot w}{S}; \quad (2)$$

где i – ток в индукторе; w – число витков индуктора; S – сечение витка индуктора.

ЭДУ f_z , действующие на якорь, находятся с использованием тензора натяжения Максвелла:

$$\overline{f_z} = \frac{1}{2} \cdot \int_S (\overline{H} \cdot \{\overline{B} \cdot \overline{n}\} + \overline{B} \cdot \{\overline{H} \cdot \overline{n}\} + \overline{n} \cdot \{\overline{B} \cdot \overline{H}\}) \cdot dS; \quad (3)$$

где $\overline{n}$ – вектор внешней нормали к поверхности интегрирования dS .

Плотность тока сторонних источников, может быть определена с использованием уравнения электрической цепи для многovitкового индуктора:

$$u + e = (R_e + R) \cdot i + L_e \cdot \frac{di}{dt}; \quad (4)$$

где u – напряжение источника; e – противоЭДС; R_e – активное сопротивление внешней цепи; R – активное сопротивление индуктора; i – ток индуктора; L_e – индуктивность внешней цепи.

В качестве источника напряжения используется предварительно заряженный ЕНЭ:

$$u = U_0 - \frac{1}{C} \cdot \int_t i \cdot dt; \quad (5)$$

где U_0 – начальное напряжение ЕНЭ; C – емкость ЕНЭ.

Значение противоЭДС можно представить следующим образом:

$$e = -\frac{w}{S} \iiint_V \frac{d(\overline{A})_f}{dt} \cdot dV; \quad (6)$$

где w – число витков индуктора; S – площадь поперечного сечения индуктора, пронизываемая магнитным потоком; $(\overline{A})_f$ – проекция векторного магнитного потенциала на направление обхода контура; V – объем индуктора.

Окончательно уравнение для электрической цепи представляется в виде:

$$U = (R_e + R) \cdot i + L_e \cdot \frac{di}{dt} - \frac{w}{S} \iiint_V \frac{d(\overline{A})_f}{dt} \cdot dV; \quad (7)$$

Механические процессы ИДД можно описать системой уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dm(z)}{dz} \cdot v^2 + m(z) \cdot \frac{d(v)}{dt} = f_z(z) - P(z); \\ \frac{d(z)}{dt} = v; \\ z(0) = 0_{xyz}, v(0) = 0; \end{array} \right. \quad (8)$$

где z – перемещение якоря; v – скорость якоря; $m(z)$ – масса движущихся частей, приведенная к якорю; $P(z)$ – противодействующая сила, приведенная к якорю.

Полученные уравнения (1)-(8) представляют собой систему уравнений, которые описывают рабочие процессы в ИДД. Решение данной системы может быть получено с использованием метода конечных элементов для интегрирования по пространственным переменным и усовершенствованного метода Гира для интегрирования по времени. Поскольку метод конечных элементов плохо адаптирован для решения нестационарных задач с пространственным изменением элементов, то для расчета используется "деформируемая" сетка. При изменении положения элемента координаты его границ деформируются в соответствии с заданным законом движения (8). Поскольку размер и форма ячеек сетки существенно влияют на точность расчетов, то при движении области на каждом временном шаге проверяется "качество" перестраиваемой сетки.

Электромагнитные процессы в ИДД с дисковым якорем. На рис.1 схематично показан ИДД, у которого многovitковый индуктор 1 коаксиально расположен относительно электропроводящего якоря 2, выполненного в форме круглого диска. Индуктор 1 возбуждается от ЕНЭ аperiodическим импульсом тока, для чего индуктор шунтирован обратным диодом. На рис.1 показано распределение индукции магнитного поля в зоне индуктора и якоря в момент максимума ЭДУ.



Рис.1 – Распределение индукции: 1 – индуктор ИДД; 2 – якорь ИДД.

Неподвижный индуктор состоит из двухслойной плотно намотанной круглой обмотки, замкнутой эпоксидной смолой в стекло-текстолитовом прямоугольном корпусе (рис. 2,а). Обмотка индуктора и якорь выполнены из технической меди.



Рис. 2 – Элементы ИДД: а – индуктор; б – круглый якорь; в – боек; г – прямоугольный якорь

Рассмотрим две конструкции якоря, обеспечивающие разгон бойка (рис. 2,в). Боек проходит через центральные отверстия индуктора и якоря. Круглый якорь состоит из соединенных между собой медного и силового (стального) дисков с двумя возвратными пружинами (рис. 2,б). Четыре крепежных отверстия равномерно расположены на расстоянии $d=0,125D_{ex2}$ от центра, где D_{ex2} – внешний диаметр якоря.

Прямоугольный якорь состоит из медной пластины, которая прикреплена к силовой пластине с отогнутыми направляющими краями. Крепежные отверстия расположены в углах якоря (рис. 2,г). На рис. 2,б и 2,г показаны якоря со стороны силовой пластины. Силовые пластины позволяют передавать механический импульс от медного диска якоря исполнительному элементу ИДД – бойку (рис. 2,в).

В качестве базового варианта используем ИДД, якорь которого выполнен в форме круглого сплошного диска, коаксиально расположенного относительно индуктора. Основные параметры этого двигателя представлены в табл.

Таблица – Основные параметры двигателя.

Параметр	Обозначение	Величина
Внешний диаметр индуктора	D_{ex1}	100 мм
Внутренний диаметр индуктора	D_{in1}	10 мм
Высота индуктора	H_1	10 мм
Внешний диаметр якоря	D_{ex2}	100 мм
Внутренний диаметр якоря	D_{in2}	6 мм
Высота якоря	H_2	3 мм
Расстояние между индуктором и якорем	δ	1 мм
Количество витков индуктора	N_1	46 шт
Сечение шины индуктора	$a \times b$	$1,8 \times 4,8 \text{ мм}^2$
Емкость ЕНЭ	C	2850 мкФ
Зарядное напряжение ЕНЭ	U_0	400 В

На рис. 3 показаны временные характеристики базового варианта ИДД: плотность тока в индукторе j_1 , усредненная по сечению плотность тока в якоре j_2 , величина f_z и импульс F_z ЭДУ, действующие на якорь в аксиальном направлении.

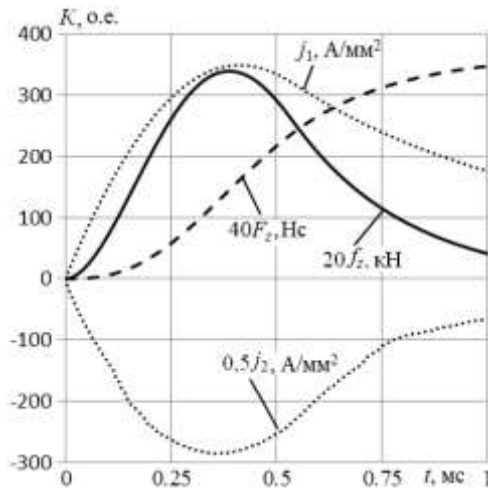


Рис. 3. Временные характеристики ИДД.

Разрядный ток в индукторе, индуцированный ток в якоре и ЭДУ имеют характер полярных импульсов. В результате сохранения полярности величины ЭДУ f_z происходит увеличение аксиального импульса ЭДУ

$$F_z = \int f_z dt, \quad (9)$$

в начале рабочего процесса с последующим насыщением к концу. Однако помимо изменения указанных рабочих показателей во времени наблюдается пространственная неравномерность электромеханических процессов.

На рис. 1 показано 2D распределение магнитной индукции в активных элементах ИДД в момент максимума ЭДУ (0,37 мс). В последующем все распределения параметров будем рассматривать при максимуме ЭДУ, действующих на якорь. Можно отметить существенную неравномерность распределения индукции магнитного поля, как в радиальном, так и в аксиальном направлениях в активных элементах ИДД. Наибольшая индукция возникает в центральной области индук-

тора и в зоне между индуктором и якорем, а наименьшая – внутри индуктора.

Кроме того, наблюдается и пространственная неравномерность распределения индуцированного тока по сечению якоря. На рис. 4 представлено распределение средней плотности тока по сечению якоря базового варианта ИДД в радиальном направлении в разные моменты времени. Наименьшая плотность тока наблюдается на внутреннем радиусе якоря. Расположение области с максимальной плотностью индуцированного тока не является постоянной: в начальный момент (до 0,2 мс) она находится на наружной поверхности, а со временем (после 0,3 мс) перемещается во внутреннюю область якоря.

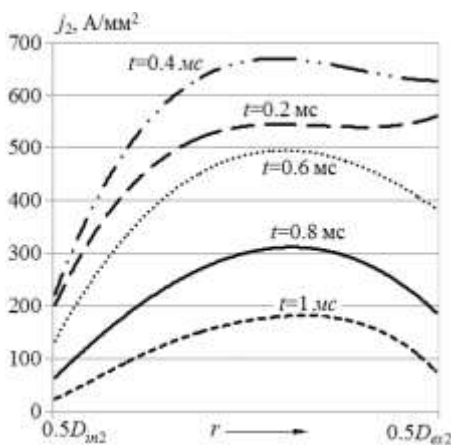


Рис. 4 – Распределение средней плотности тока якоря в радиальном направлении в разные моменты времени.

Таким образом, в ИДД наблюдаются существенные пространственно-временные неравномерности распределения индукции магнитного поля и индуцированного тока по сечению якоря. В базовом варианте ИДД, имеющего осевую симметрию индуктора и якоря, пространственные распределения электромагнитных параметров описываются 2D математической моделью.

Влияние оверстий в круглом якоре на силовые показатели ИДД. Поскольку медный диск якоря не имеет достаточной механической жесткости, то к нему при помощи крепежных элементов присоединяется силовой диск. Возникающие при этом цилиндрические крепежные отверстия в медном диске якоре нарушают 2D распределение

индуцированных токов. Рассмотрим влияние количества и места расположения крепежных отверстий (диаметр 4 мм) в медном диске якоря, которые симметрично расположены относительно оси якоря.

На рис. 5 представлен общий вид индуктора и якоря с четырьмя крепежными отверстиями, в котором показано распределение индуцированного тока в момент максимума ЭДУ. На рис. 6 представлены якоря с различным количеством и расположением крепежных отверстий и распределением плотности индуцированного тока на прилегающей к индуктору поверхности. Расположение отверстий и их количество влияют на распределение индуцированной плотности тока, но в основном вблизи отверстий.

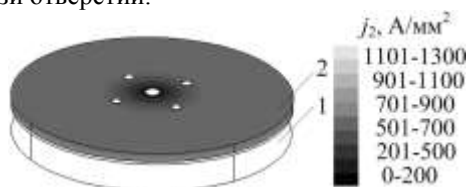


Рис. 5 – Общий вид индуктора 1 и якоря 2 с распределением тока в якоря.

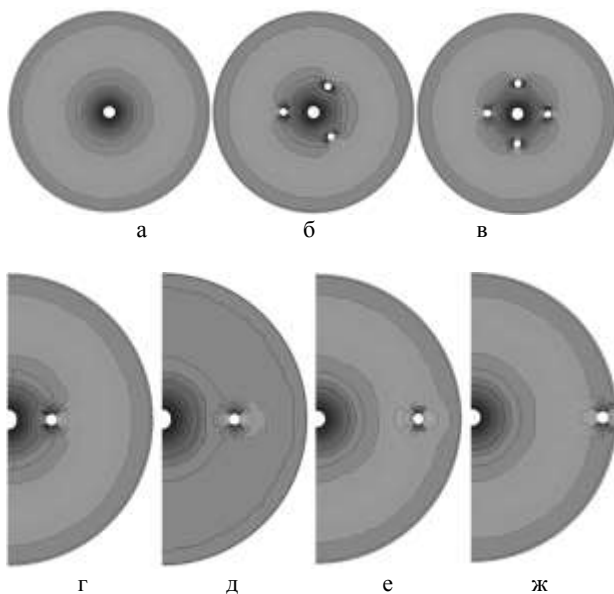


Рис. 6 – Распределение плотности индуцированного тока в якорях с различными отверстиями.

На рис. 7 показана зависимость импульса ЭДУ от диаметра d окружности, на котором расположены два отверстия якоря (рис. 6, г-д).

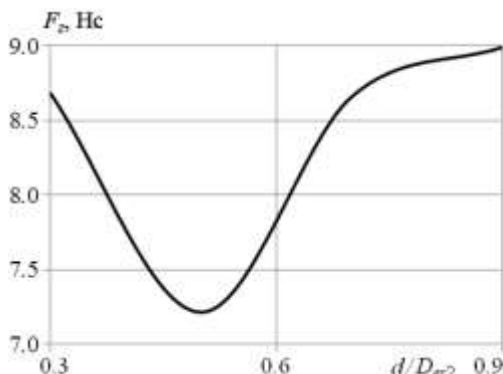


Рис. 7 – Зависимость импульса ЭДУ от относительного диаметра d окружности, на котором расположены два отверстия якоря.

Как показывают расчеты, если отверстия расположены вблизи центрального отверстия якоря, то они мало влияют на эффективность ИДД. В наибольшей степени эффективность ИДД снижается при расположении отверстий вблизи среднего радиуса якоря ($d=0,5D_{эк2}$). Это можно объяснить тем, что в этой области якоря индуцируется ток с наибольшей плотностью. Если отверстия расположены вблизи наружного диаметра якоря, то происходит даже некоторое повышение эффективности ИДД, что можно пояснить выталкиванием индуцированного тока в среднюю часть якоря, где плотность тока максимальна (рис. 4).

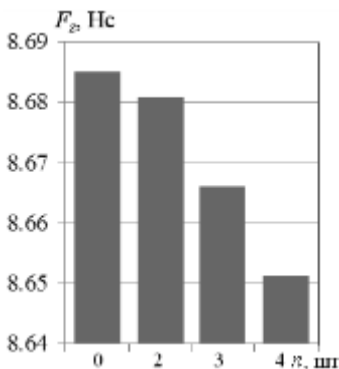


Рис. 8 – Зависимость импульса ЭДУ от количества отверстий.

На рис. 8 показана зависимость импульса ЭДУ от количества отверстий n , расположенных на одном расстоянии от центра ($d=0,3D_{эк2}$). Как показывают расчеты, с увеличением количества отверстий происходит снижение величины импульса ЭДУ. Это можно объяснить тем, что каждое отверстие локально перераспределяет индуцированный ток якоря так, что в тангенциальном направлении плотность тока уменьшается, а в радиальном направлении уве-

личивается. При этом уменьшение плотности тока в тангенциальном направлении происходит в большей степени, чем увеличение в радиальном направлении. Однако в целом, влияние количества отверстий n , расположенных на окружности одного радиуса, на величину импульса ЭДУ незначительно и находится на уровне до 1 %.

Исходя из проведенных расчетов при учете симметричности конструкции и надежности крепления силового диска с медным якорем, выбрано четыре крепежных элемента.

На рис. 9 показаны распределения плотностей индуцированного тока в радиальных сечениях якоря в момент максимума ЭДУ при наличии четырех отверстий, расположенных на одном расстоянии от центра ($d=0,3D_{ex2}$).

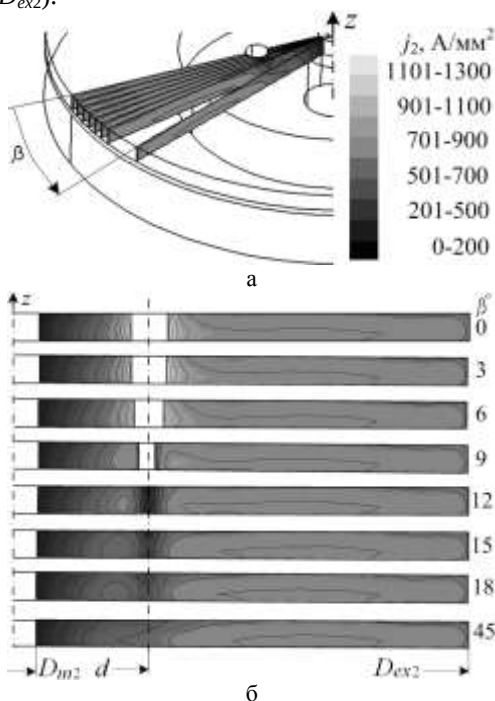


Рис. 9 – Распределения плотностей индуцированного тока в радиальных сечениях якоря: а – схема расположения сечений якоря; б – распределения в них плотностей тока.

При угле $\beta=0^\circ$ сечение проходит через центр отверстия, а при $\beta=45^\circ$ сечение расположено на равном расстоянии от двух смежных

отверстий. Как следует из представленных распределений, изменение плотности тока по сечению якоря происходит в основном вблизи отверстия. Уже на расстоянии, равном 2-3 диаметра отверстия индуцированный ток практически не меняется. Представленные распределения подтверждают, что вблизи отверстия происходит увеличение плотности индуцированного тока в радиальном направлении и уменьшение – в тангенциальном направлении.

На рис. 10 показано изменение средней плотности тока якоря в радиальном направлении в крайних сечениях при $\beta=0^\circ$ и при $\beta=45^\circ$. Наличие отверстия приводит к резкому увеличению плотности тока на его краях. Но по мере удаления от отверстия плотность тока приближается к плотности тока базового варианта якоря (без отверстий).

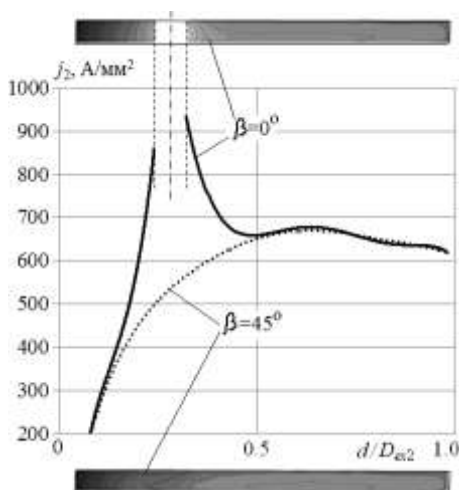


Рис.10 – Средняя плотность тока якоря в радиальном направлении в сечениях, соответствующим углам $\beta=0^\circ$ и $\beta=45^\circ$.

На рис. 11 представлены распределения плотностей индуцированного тока на отдаленной и прилежащей наружных сторонах якоря относительно индуктора. При сохранении общей картины распределения наблюдается меньшая плотность тока на отдаленной стороне якоря по отношению к прилегающей к индуктору стороне.

Наличие отверстий приводит к перераспределению магнитных полей в окружающем их пространстве. На рис. 12 представлено распределение индукции магнитного поля в радиальном сечении ИДД, якорь которого имеет 4 отверстия. Отверстие уменьшает магнитное

поле в области между якорем и индуктором непосредственно под отверстием. При этом наблюдается концентрация поля на краях отверстия, обращенных к индуктору.

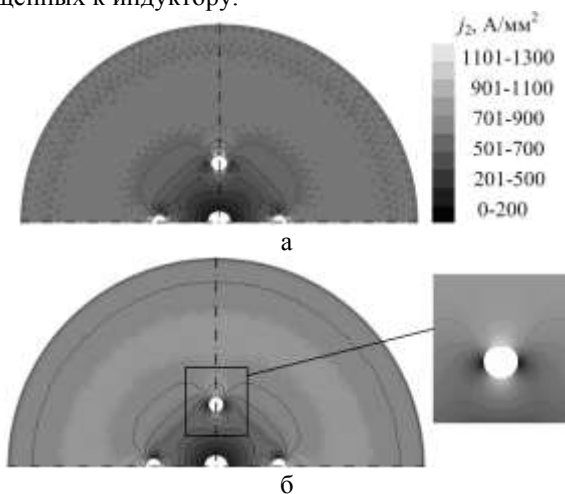


Рис.11 – Распределения плотностей тока относительно индуктора: а – на отдаленной стороне якоря; б – на прилегающей стороне якоря.

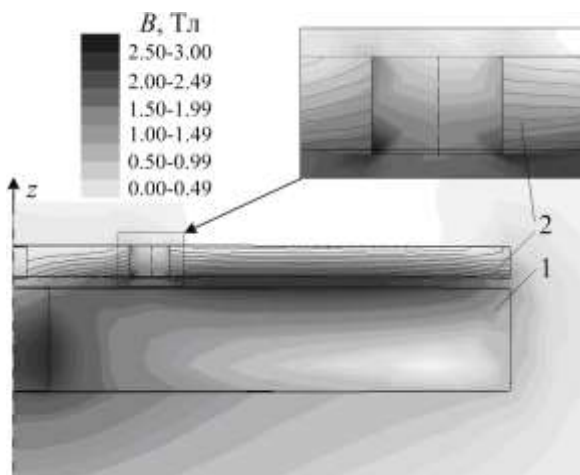


Рис. 12 – Распределение индукции магнитного поля в ИДД с выделением зоны отверстия якоря: 1 – индуктор; 2 – якорь.

Влияние прямоугольного якоря на силовые процессы ИДД. Прямоугольный якорь (рис. 2,г) имеет ряд конструктивных преимуществ по сравнению с круглым якорем при использовании в автономных устройствах с высокими удельными показателями. При этом возникает вопрос о влиянии такой формы на характер распределения индуцированного тока в якорь, в то время, как индуктор имеет круглую форму. На рис. 13,а показан общий вид ИДД, у которого прямоугольный якорь выполнен с центральным отверстием и с четырьмя крепежными отверстиями, расположенными в углах. Ширина прямоугольного якоря $B=100$ мм, длина $A=120$ мм и высота $H_2=3$ мм. На рис. 13,б показано распределение индуцированного тока в якорь. Вблизи центральной оси распределение тока практически симметрично относительно оси, а основные отличия возникают на концах прямоугольного якоря. На участках якоря, расположенных вне индуктора (в углах и концах длинной стороны) плотности индуцированного тока минимальны, что показывает целесообразность расположения здесь крепежных отверстий.

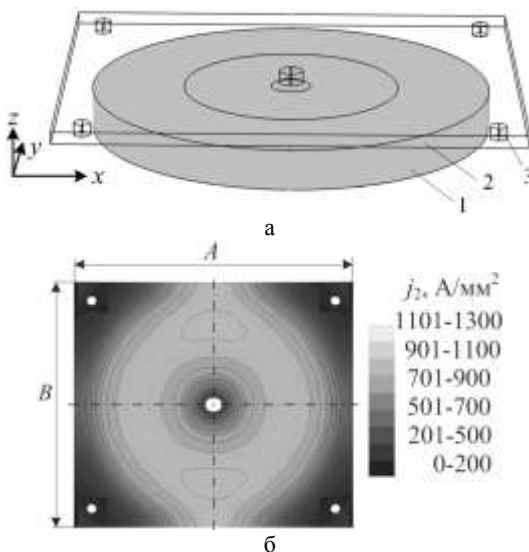


Рис. 13 – Общий вид ИДД: а – с прямоугольным якорем; б – распределение плотности тока в якорь; 1 – индуктор; 2 – якорь; 3 – крепежное отверстие.

При изменении длины якоря A меняется распределение индуцированного тока якоря. В коротком якорь, длина которого меньше по-

ловины диаметра индуктора (рис. 14,а), максимальная плотность тока концентрируется на его краях.

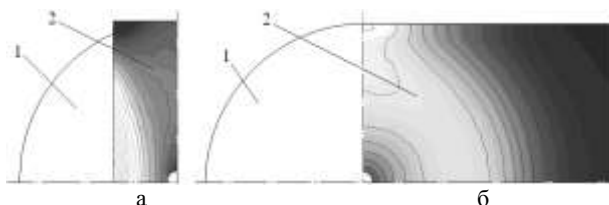


Рис. 14 – Распределение индуцированного тока в якоре длиной: а – $A=0,4B$; б – $A=1,6B$; 1 – индуктор; 2 – якорь.

В длинном якоре, длина A которого превышает диаметр индуктора (рис. 14,б), максимальная плотность имеет место в средней части, в то время как на краях ток минимален. На рис. 14 использована та же шкала плотности тока, что и на рис. 13.

Изменение длины прямоугольного якоря A и связанное этим перераспределение индуцированного тока влияет на величину импульса ЭДУ F_z (рис. 15). Однако зависимость эта нелинейная. Так при увеличении длины A в два раза от $0,4B$ до $0,8B$ импульс ЭДУ увеличивается более, чем в 2,5 раз. А при увеличении длины A от $0,8B$ до $1,2B$ импульс ЭДУ увеличивается лишь в 1,1 раз, а при дальнейшем увеличении длины якоря величина импульса ЭДУ F_z практически не меняется. Таким образом, наиболее целесообразно изготавливать якорь, длина которого примерно равна его ширине.

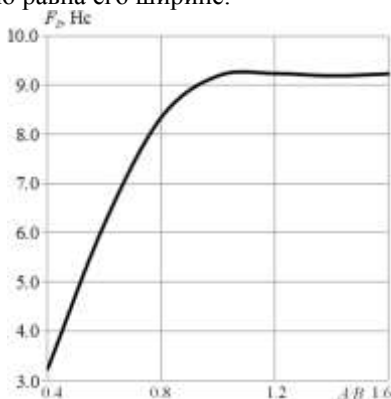


Рис.15 – Зависимость импульса ЭДУ от относительной длины A прямоугольного якоря.

Влияние наклона круглого якоря на силовые процессы ИДД.

Рассмотрим влияние угла наклона якоря α в исходном состоянии относительно индуктора на электромагнитные и электродинамические показатели ИДД (рис. 16,а). При наклоне якоря вдоль оси x наблюдается неравномерность распределения индуцированного тока и аксиальных ЭДУ. Максимальная плотность тока вдоль оси x наблюдается в области ниже и вблизи центральной оси, а минимальная – в нижней точке, прилегающей к индуктору (рис. 16,а). Выше центральной оси ближе к наружной поверхности наблюдается второй пик плотности тока, но его величина значительно ниже первого пика.

Однако распределение ЭДУ по поверхности наклоненного якоря совершенно иное (рис. 16,б). Максимальные ЭДУ действуют на нижний участок, прилегающий к индуктору и вдоль оси x уменьшаются. При этом в нижней части якоря недалеко от центрального отверстия существует область, в которой ЭДУ меняют знак на противоположный.

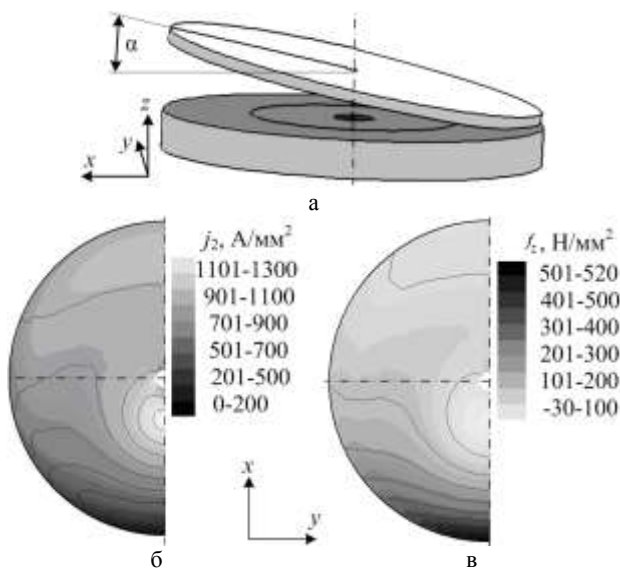


Рис.16 – ИДД: а – расположение якоря относительно индуктора; б – распределение плотности тока в якоря; в – распределение аксиальных ЭДУ в якоря при $\alpha=40^\circ$.

Если якорь и индуктор расположены аксиально, то существует симметрия магнитного поля относительно оси z (рис. 17,а). При наклоне якоря относительно индуктора магнитное поле не имеет указанной симметрии (рис. 17,б). Это поле усиливается в области между индуктором и прилегающей к нему нижней частью якоря. В области между индуктором и поднятой частью якоря поле ослабляется.

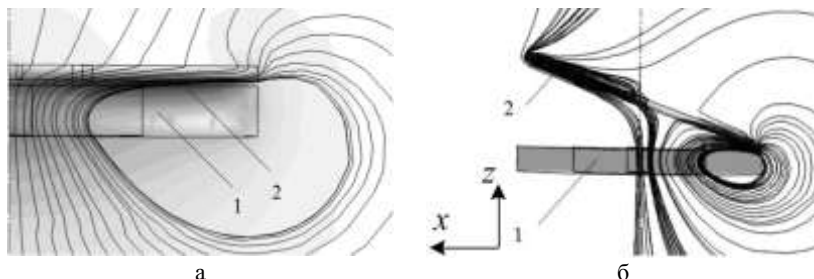


Рис. 17 – Распределение силовых линий магнитного поля: а – в поперечном сечении на половине ИДД при $\alpha=0^\circ$; б – по всему ИДД при $\alpha=40^\circ$.

Вследствие пространственного перераспределения магнитных полей и индуцированных токов в якоре, обусловленного его наклоном относительно индуктора, происходит изменение ЭДУ, действующих на якорь.

На рис. 18 показано изменение аксиального F_z и продольного F_x импульсов ЭДУ, действующих на якорь, от угла его наклона α относительно индуктора. При увеличении угла наклона на 5° аксиальный импульс силы F_z снижается на 31 %, а при наклоне на 10° F_z – на 64 %. При этом возникает продольный импульс ЭДУ F_x , направленный вдоль оси наклона. При этом если аксиальный импульс силы F_z с увеличением угла наклона падает, то продольный импульс F_x имеет более сложный характер изменения. При увеличении угла наклона α от 0° до 12° величина F_x возрастает, а при дальнейшем увеличении α указанный импульс ЭДУ снижается.

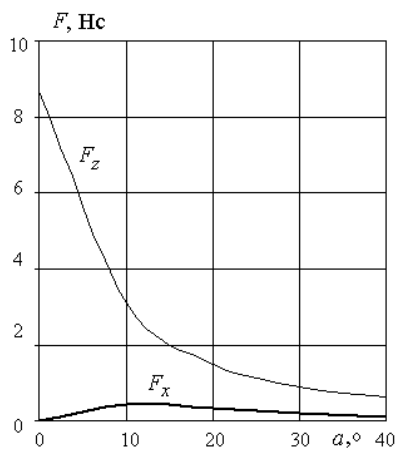


Рис. 18 – Зависимость величины импульсов ЭДУ от угла наклона якоря относительно индуктора.

Экспериментальные исследования. Для проведения испытаний использовалась экспериментальная установка, представленная на рис. 19, которая содержит силовую опору 1 в виде скобы, внутри которой установлен индуктор 2.



Рис. 19 – Общий вид экспериментальной установки.

На индукторе коаксиально расположен медный якорь 3, к которому присоединен силовой диск 4. С диском 4 соединен центральный направляющий штырь 5. Сверху на наружной поверхности силовой опоры 1 расположены датчик виброускорения датчик 6 и вертикальный резисторный датчик перемещения 7. Возбуждение индуктора 2 осуществлялось от ЕНЭ емкостью $C=1660$ мкФ и $U=300$ В, с использованием электронной системы, которая формировала полярный импульс тока, через токовводы 8.

На рис. 20 показаны медные якоря круглой и прямоугольной формы, которые были использованы в экспериментах. Якоря с силовыми пластинами соединены при помощи четырех крепежных элементов, расположенных симметрично в круглом якоря и в углах прямоугольного якоря.

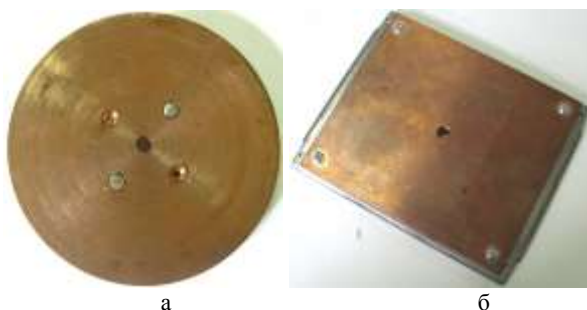


Рис. 20 – Экспериментальные образцы якоря; а – круглой формы; б – прямоугольной формы.

На рис. 21 показаны осциллограммы аperiодического импульса тока индуктора и датчика перемещений круглого якоря вертикально вверх. На рис. 22 представлены осциллограммы импульса тока и датчика виброускорения, полученные при использовании прямоугольного заторможенного якоря. Как следует из представленных осциллограмм, между началом импульса возбуждения индуктора и началом механических процессов якоря (перемещением или соударением бойка заторможенного якоря) имеется время задержки, равное примерно 1 мс.

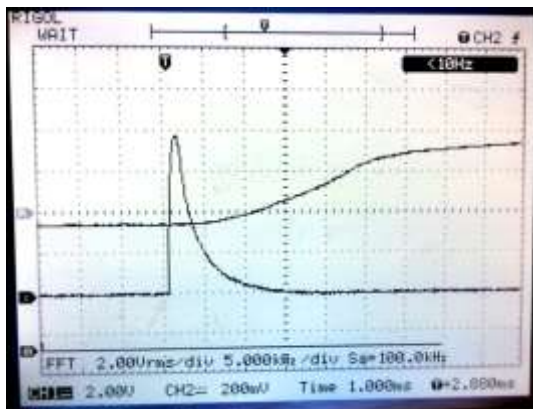


Рис. 21 – Осциллограммы аperiodического импульса тока индуктора (канал 1) и перемещения круглого якоря (канал 2).

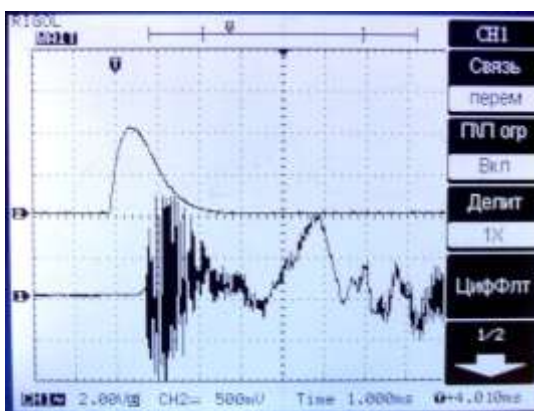


Рис. 22 – Осциллограммы аperiodического импульса тока индуктора (канал 2) и датчика виброускорения (канал 1).

Из полученных осциллограмм следует, что форма и величина импульсов тока в индукторе удовлетворительно (см. рис.3) совпадает с расчетными кривыми. Аналогичное утверждение можно сделать относительно механических процессов: динамики перемещения якоря и величины импульса ЭДУ, пропорциональной величине начального размаха виброускорений. Таким образом, можно отметить удовлетворительную сходимость экспериментальных и основных расчетных результатов.

Выводы.

Разработана 3D математическая модель ИДД, учитывающая взаимосвязанные электромагнитные, механические и тепловые процессы.

Исследовано влияние формы якоря, расположение и количество крепежных отверстий в круглом якоре, его наклон по отношению к индуктору на силовые показатели ИДД.

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили основные результаты расчетов и теоретические положения.

Список литературы: 1. *Болюх В.Ф., Данько В.Г.* Лінійні електромеханічні перетворювачі імпульсної дії. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2006. – 260 с. 2. *Стрижачов Е.Л., Хахин Н.А., Бацемакин Д.С.* Автоматизированная установка для магнитно-импульсной сварки. Автоматическая сварка. – 2004. – № 2. – С. 53-55. 3. *Татмьшевский К.В., Семенович М.Л., Козлов С.А.* Магнитно-импульсные метательные установки для проведения ударных испытаний взрывательных устройств боеприпасов и средств бронезащиты. // Известия РАН. – 2005. – № 4. – С. 22-31. 4. *Мазуренко М.И., Петухов В.А., Поводайло В.А.* и др. Электродинамический импульсный клапан для получения молекулярных пучков // Приборы и техника эксперимента. – 2002. – № 2. – С. 152-155. 5. *Кузнецов П.В., Толмачев Н.С., Харитонов В.Д.* и др. Индукционно-динамическая система очистки сушильного оборудования // Молочная промышленность. – 1989. – № 1. – С. 25-26. 6. *Анисимов Г.И.* Импульсные способы зачистки остатков смерзшихся грузов // Промышленный транспорт. – 1988. – № 2. – С. 22-25. 7. *Болюх В.Ф., Щукин И.С.* Индукционно-импульсное гашение скорости подвижного объекта // Електротехніка і електромеханіка. – 2012. – № 3. – С. 14-20. 8. *Болюх В.Ф., Винниченко А.И.* Концепция индукционно-динамической катапульты баллистического лазерного гравиметра // Измерительная техника. – 2013. – № 10. – С. 6-10. 9. *Болюх В.Ф., Олексенко С.В., Щукин И.С.* Влияние параметров ферромагнитного сердечника на эффективность индукционно-динамического двигателя // Електротехніка і електромеханіка. – 2012. – № 6. – С. 20-27. 10. *Болюх В.Ф., Бенаисса Омар, Олексенко С.В.* Методика выбора параметров индукционно-динамического двигателя с ферромагнитным сердечником // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2013. – № 51. – С. 3-15.

Поступила в редколлегию 17.12.2013

УДК 621.313:536.2.24:539.2

Влияния формы и расположения якоря на эффективность индукционно-динамического двигателя с использованием 3D модели / Болюх В.Ф., Олексенко С.В., Щукин И.С. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2013. – № 65 (1038). – С. 63-83. Бібліогр.: 10 назв.

Розроблена тримірна математична модель індукційно-динамічного двигуна, яка враховує взаємопов'язані електромагнітні, механічні та теплові процеси. Досліджено вплив форми якоря, розташування та кількості кріпильних отворів в круглому якорі, його нахил по відношенню до індуктора на силові показники двигуна. Проведені експериментальні дослідження електричних та механічних процесів в індукційно-динамічному двигуні, які підтвердили основні розрахункові результати та теоретичні положення.

Ключові слова: індукційно-динамічний двигун, якір, тривимірна математична модель, форма якоря, нахил якоря по відношенню до індуктора, експериментальні дослідження.

Developed a three-dimensional mathematical model of induction-dynamic engine, taking into account the related electromagnetic, mechanical, and thermal processes. The influence of the anchor form, location and number of mounting holes in the round anchor, its inclination with respect to the inductor on the power performance of the engine. Experimental studies of electrical and mechanical processes in induction-dynamic engine, which confirmed the main calculation results and theoretical positions.

Keywords: induction-dynamic engine, anchor, three-dimensional mathematical model, the shape of anchors, anchor inclination with respect to the inductor, and experimental investigations.

Д.В. КОЛЬВАХ, студент, НТУ "ХПИ"

А.Н. ПЕТРЕНКО, канд. техн. наук, ст. преподаватель, ХНУГХ
им. А.Н. Бекетова, Харьков

Н.Я. ПЕТРЕНКО, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ"

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ АСИНХРОННОГО ЧАСТОТНО-УПРАВЛЯЕМОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ПЕРЕМЕЖАЮЩЕМСЯ РЕЖИМЕ РАБОТЫ S6

В рассматриваемой статье исследовано тепловое состояние отдельных узлов двигателя на базе динамической тепловой схемы. На основе ЭТС составлена система уравнений теплового баланса асинхронного частотно-управляемого двигателя, работающего в перемежающемся режиме S6. С помощью системы уравнений теоретически исследованы и экспериментально подтверждены температуры наиболее нагретых узлов двигателя АИР90LB2 и их влияние на тепловое состояние двигателя в режиме S6.

Ключевые слова: преобразователь частоты, двигатель, потери, обмотка, температура, высшие гармоники.

Введение. Повышение технико-экономических показателей электроприводов в значительной мере обусловлена необходимостью энергосбережения, возможностью разработки и усовершенствования существующих технологических процессов, повышение качества и конкурентоспособности продукции. Характерной особенностью работы асинхронных двигателей в составе многих электроприводов является неравномерность нагрузки, что вызвано технологическими условиями производства. По данным [1] уменьшение нагрузки до $0,5P_{2N}$ приводит к снижению КПД на 3-4 % и $\cos \varphi$ на 20-22 %, а при уменьшении нагрузки до $0,25P_{2N}$ снижение составляет 13-16 % и 37-45 % соответственно. Существенным улучшением энергетических показателей асинхронных двигателей, работающих при широком изменении нагрузки, является замена нерегулируемых двигателей на регулируемые.

Технико-экономические показатели регулируемых электроприводов на базе асинхронных двигателей (РЭП АД) в значительной мере зависят от типа источника питания. Для питания двигателей широко используются полупроводниковые преобразователи частоты (ППЧ).

В эксплуатации находится большое количество ППЧ с автономным инвертором (ППЧ с АИН), на выходе которого получается напряжение

ступенчатой формы, что обуславливает наличие высших гармоник напряжения (ВГН), которые увеличивают основные и добавочные потери мощности. Основные и добавочные потери являются основным источником тепла в активной части машины. Нагрев узлов двигателя влияет на старение изоляции и в конечном счете на надежность машины.

Асинхронные двигатели в нестационарном тепловом режиме представляют собой комплекс взаимосвязывающих элементов, изменение температуры которых описывается системой уравнений теплового баланса. Для исследования АД в нестационарном режиме применяется динамическая эквивалентная тепловая схема (ЭТС) (рис. 1).

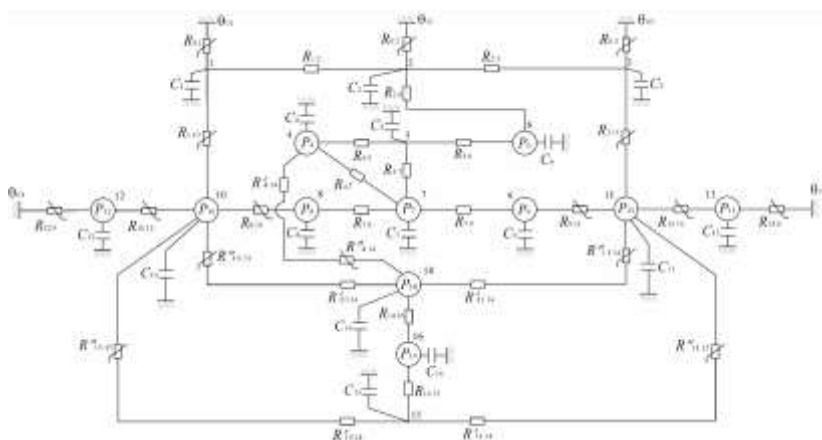


Рис. 1 – Динамическая ЭТС асинхронного частотно-управляемого двигателя.

Динамическое тепловое состояние асинхронного частотно-управляемого двигателя при работе в режиме S6. При таком режиме работа двигателя под нагрузкой чередуется с холостым ходом и характеризуется продолжительностью нагрузки ПН%. На основании динамической ЭТС составлена система уравнений теплового баланса, которая для нестационарных режимов работы преобразуется в систему линейных дифференциальных уравнений первого порядка (1) [2].

Система уравнений решалась по универсально-гибридному методу Адамса-BDF. Начальные температуры $\theta_{нач}$ всех узлов одинаковы, $\theta_{01} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, время расчета 3015 секунд, шаг по времени 60 секунд [3].

$$\begin{aligned}
1. \quad C_1 \frac{d\Theta_1}{dt} &= -(\lambda_{0,1} + \lambda_{1,2} + \lambda_{1,10})\Theta_1 + \Theta_2\lambda_{1,10} + \Theta_{01}\lambda_{0,1}; \\
2. \quad C_2 \frac{d\Theta_2}{dt} &= \Theta_1\lambda_{1,2} - \Theta_2(\lambda_{0,2} + \lambda_{1,2} + \lambda_{2,3} + \lambda_{2,6}) + \Theta_3\lambda_{2,3} + \Theta_6\lambda_{2,6} + \Theta_{02}\lambda_{0,2}; \\
3. \quad C_3 \frac{d\Theta_3}{dt} &= \Theta_2\lambda_{2,3} - \Theta_3(\lambda_{0,3} + \lambda_{2,3} + \lambda_{3,11}) + \Theta_{11}\lambda_{3,11} + \Theta_{03}\lambda_{0,3}; \\
4. \quad C_4 \frac{d\Theta_4}{dt} &= -\Theta_4(\lambda_{4,5} + \lambda_{4,7} + \lambda_{4,14}) + \Theta_5\lambda_{4,5} + \Theta_7\lambda_{4,7} + \Theta_{14}\lambda_{4,14} + P_4; \\
5. \quad C_5 \frac{d\Theta_5}{dt} &= \Theta_4\lambda_{4,5} - \Theta_5(\lambda_{4,5} + \lambda_{5,6} + \lambda_{5,7}) + \Theta_6\lambda_{5,6} + \Theta_7\lambda_{5,7}; \\
6. \quad C_6 \frac{d\Theta_6}{dt} &= \Theta_2\lambda_{2,6} - \Theta_6(\lambda_{2,6} + \lambda_{5,6}) + \Theta_5\lambda_{5,6} + P_6; \\
7. \quad C_7 \frac{d\Theta_7}{dt} &= \Theta_4\lambda_{4,7} + \Theta_5\lambda_{5,7} - \Theta_7(\lambda_{7,8} + \lambda_{4,7} + \lambda_{5,7} + \lambda_{7,9}) + \Theta_8\lambda_{7,8} + \\
&\quad + \Theta_9\lambda_{7,9} + P_7; \\
8. \quad C_8 \frac{d\Theta_8}{dt} &= \Theta_7\lambda_{7,8} - \Theta_8(\lambda_{7,8} + \lambda_{8,10}) + \Theta_{10}\lambda_{8,10} + P_8; \\
9. \quad C_9 \frac{d\Theta_9}{dt} &= \Theta_7\lambda_{7,9} - \Theta_9(\lambda_{7,9} + \lambda_{9,11}) + \Theta_{11}\lambda_{9,11} + P_9; \\
10. \quad C_{10} \frac{d\Theta_{10}}{dt} &= \Theta_8\lambda_{8,10} - \Theta_{10}(\lambda_{1,10} + \lambda_{8,10} + \lambda_{10,12} + \lambda_{10,14} + \lambda_{10,15}) + \Theta_1\lambda_{1,10} + \\
&\quad + \Theta_{14}\lambda_{10,14} + \Theta_{15}\lambda_{10,15} + \Theta_{12}\lambda_{10,12} + P_{10}; \\
11. \quad C_{11} \frac{d\Theta_{11}}{dt} &= \Theta_3\lambda_{3,11} + \Theta_9\lambda_{9,11} - \Theta_{11}(\lambda_{3,11} + \lambda_{9,11} + \lambda_{11,13} + \lambda_{11,14} + \lambda_{11,15}) + \\
&\quad + \Theta_{13}\lambda_{11,13} + \Theta_{14}\lambda_{11,14} + \Theta_{15}\lambda_{11,15} + P_{11}; \\
12. \quad C_{12} \frac{d\Theta_{12}}{dt} &= \Theta_{10}\lambda_{10,12} - \Theta_{12}(\lambda_{10,12} + \lambda_{12,0}) + \Theta_{01}\lambda_{12,0} + P_{12}; \\
13. \quad C_{13} \frac{d\Theta_{13}}{dt} &= \Theta_{11}\lambda_{11,13} - \Theta_{13}(\lambda_{11,13} + \lambda_{13,0}) + \Theta_{01}\lambda_{13,0} + P_{13}; \\
14. \quad C_{14} \frac{d\Theta_{14}}{dt} &= \Theta_4\lambda_{4,14} + \Theta_{10}\lambda_{10,14} + \Theta_{11}\lambda_{11,14} - \\
&\quad - \Theta_{14}(\lambda_{4,14} + \lambda_{10,14} + \lambda_{11,14} + \lambda_{14,16}) + \Theta_{16}\lambda_{14,16} + P_{14}; \\
15. \quad C_{15} \frac{d\Theta_{15}}{dt} &= \Theta_{10}\lambda_{10,15} + \Theta_{11}\lambda_{11,15} - \Theta_{15}(\lambda_{10,15} + \lambda_{11,15} + \lambda_{16,15}) + \\
&\quad + \Theta_{16}\lambda_{16,15} + P_{15}; \\
16. \quad C_{16} \frac{d\Theta_{16}}{dt} &= \Theta_{14}\lambda_{14,16} + \Theta_{15}\lambda_{16,15} - \Theta_{16}(\lambda_{14,16} + \lambda_{16,15}) + P_{16}.
\end{aligned} \tag{1}$$

Для исследования двигателя АИР90LB2 принято ПН%=60 %, длительность цикла 10 минут, интервал нагрузки T_n – 6 минут, интервал холостого хода T_x 4 минуты. При этом каждый из интервалов ха-

рактируется своим уровнем основных и добавочных потерь $\sum P_{\text{доб}}$, которые от основной гармоник и от высших гармоник напряжения на интервалах T_n и T_x одинаковы. Рассмотрен закон пропорционального регулирования при номинальной нагрузке двигателя $v = \alpha = 1,0$

$$\left(v = \frac{U_1}{U_{1N}}, \alpha = \frac{f_1}{f_{1N}} \right).$$

При переходе от режима номинальной нагрузки к

режиму холостого хода основные и дополнительные электрические и магнитные потери уменьшаются на 620 %. Уменьшается температура окружающего воздуха Θ_{02} и Θ_{03} в наружном контуре охлаждения с учетом неизменности дополнительных потерь. Это приводит к изменению мощности тепловыделения в узлах 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 14 динамической ЭТС. В остальных узлах двигателя мощности тепловыделения остаются без изменения. При переходе в пределах K -го цикла от интервала нагрузки T_n к интервалу T_x и от интервала холостого хода K -го цикла к интервалу нагрузки $(K + 1)$ -го цикла, начальные значения температур на интервалах T_n и T_x для всех узлов динамической ЭТС будет:

$$\Theta_{k \text{ нач. х.х.}} \Big|_{t=0} = \Theta_{k \text{ конц. нагр.}} \Big|_{t=T_n}, \quad \Theta_{k+1 \text{ нач. нагр.}} \Big|_{t=0} = \Theta_{k \text{ конц. х.х.}} \Big|_{t=T_x}.$$

Текущее время t на каждом интервале каждого цикла начинается с нуля: $0 \leq t \leq T_n$ и $0 \leq t \leq T_x$.

Расчет температур заканчивался, когда начальные значения температур на интервалах холостого хода двух последующих циклов отличались не более, чем на 3 %. Для этого потребовалось 28 циклов. С достаточной для тепловых расчетов квазиустановившийся режим наступает после 15 циклов. Результаты расчетов температуры узлов двигателя согласно ЭТС представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Значения температур узлов динамической ЭТС в квазиустановившемся режиме.

Номер узла	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
$\Theta, ^\circ\text{C}$ при $t = T_n$	34	52	46	68	63	59	83	88	90	63	71	50	62	103	100	101
$\Theta, ^\circ\text{C}$ при $t = T_x$	33	51	45	63	60	57	69	73	74	58	66	49	60	97	99	99

По результатам расчета построены кривые нагрева для наиболее нагретых узлов двигателя пазовых части обмотки статора (узел 7), обмотки ротора (узел 14), сердечника статора (узел 6), части корпуса, прилегающей к сердечнику статора (узел 2) и зависимости температуры пазовой части обмотки статора и ротора от времени в квазиустановившемся режиме.

Для подтверждения результатов теоретических исследований выполнены экспериментальные исследования температуры узлов статора и ротора двигателя АИР90LB2. Для исследования температуры узлов двигателя, на стадии изготовления, было заложено 37 термодатчиков СТ 1-19, обладающих высокой чувствительностью в широком диапазоне температуры от -60°C до $+300^{\circ}\text{C}$. При изменении температуры на 1°C величина сопротивления терморезистора изменялась на 6 %. По длине пакета сердечника статора установлены Термодатчики, в пазах сердечника размещались в трех сечениях: торцевые (на расстоянии 5 мм от торцов со стороны вентилятора и привода) и на середине сердечника. В сечении обмотки статора датчики размещались в центре "пучка" проводников, в нижней части "пучка" примыкающей к дну паза и в лобовых частях обмотки. Для исследования температуры узлов ротора датчики установлены в гнездах короткозамкнутых колец обмотки ротора, в радиальном канале стержня обмотки ротора. Для контроля охлаждающего воздуха датчики установлены в межреберных каналах корпуса двигателя.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований представлены на рис. 2, 3, 4.

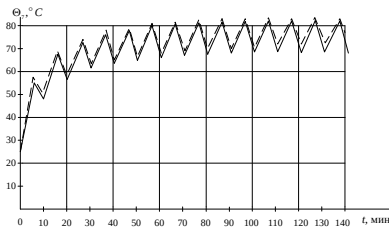


Рис. 2 – Зависимость температуры обмотки статора от времени $\gamma = \alpha = 1,0$
 — — — эксперимент
 ————— расчет

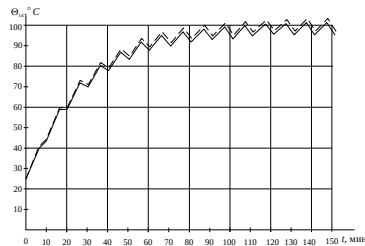


Рис. 3 – Зависимость температуры обмотки ротора от времени $\gamma = \alpha = 1,0$
 — — — эксперимент
 ————— расчет

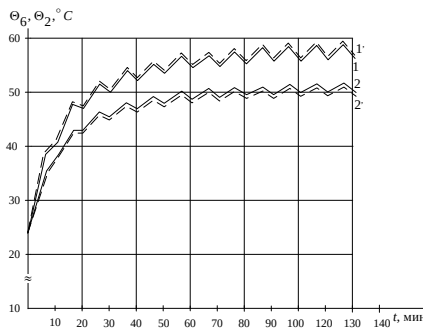


Рис. 4. – Зависимость температуры сердечника статора – 1 и корпуса – 2 от времени $\gamma = \alpha = 1,0$
 — — — — — эксперимент
 ————— расчет

Из результатов теоретических исследований следует, что теплообмен в узлах двигателя на начальном участке (первый и второй цикл) отличаются от теплообмена в квазиустановившемся режиме. Для обмотки ротора на этих циклах имеет место реверс теплового потока через воздушный зазор в сравнении с его направлением в квазиустановившемся режиме. Это обусловлено текущими значениями температур зубцов статора (узел 4) и обмотки ротора (узел 14) и соотношением теплоемкостей обмотки статора и ротора. На первом и втором цикле $\Theta_4 > \Theta_{14}$, поэтому на интервалах холостого хода не происходит уменьшение температуры обмотки ротора. В квазиустановившемся режиме $\Theta_4 = 68^\circ\text{C}$, а $\Theta_{14} = 103^\circ\text{C}$ поэтому тепловой поток через воздушный зазор идет в направлении ротор $\rightarrow$ зубцы статора. Размах колебаний температуры в квазиустановившемся режиме определяются мощностью тепловыделения узлов и тепловыми связями с другими узлами двигателя. Теоретические и экспериментальные данные показали, что наибольший размах температур отмечен для пазовой и лобовой частей обмотки статора (около 15°C). Это связано с большим изменением мощности тепловыделения в обмотке статора (узлы 7, 8, 9) (рис. 1) на интервалах T_n и T_x в сравнении с другими узлами. Для обмотки статора основные и дополнительные от ВГН потери ($P_{эл1} + P_{эл1v}$) при переходе с интервала T_n на интервал T_x уменьшаются на 600 %, для сердечника статора ($P_{маг} + P_{магv}$) на 150 %, а для обмотки ротора ($P_{эл2} + P_{эл2v}$) потери мощности уменьшаются на 200 %. Расчетные значения указанных температур приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Потери в двигателе на интервалах нагрузки и холостого хода, в Вт

Вид потерь	Интервал	
	T_n	T_x
$P_{эл1}$	301,18	50,3
$P_{эл1v}$	89,4	89,4
$P_{эл2}$	77,2	38,6
$P_{эл2v}$	103,2	103,2
P_{mag}	150,4	94
P_{magv}	18	18

Независимость дополнительных электрических потерь, обусловленных высшими гармониками напряжения $P_{эл2v}$ от величины нагрузки уменьшает размах колебаний температуры для обмоток статора и ротора.

Используя для цикла значения температур в квазиустановившемся режиме, можно эквивалентировать перемежающийся режим S6 длительным режимом S1. Это позволит оптимально по мощности использовать двигатели с номинальным режимом S1 при их работе в режимах S3, S4, S5, S6, S7, S8 (при различной длительности цикла и продолжительности включения).

Выводы. 1. На основании динамической эквивалентной схемы теплового состояния двигателя составлены уравнения теплового баланса, с помощью которых рассчитаны и экспериментально подтверждены средние температуры наиболее нагретых узлов двигателя работающего в перемежающем режиме S6.

2. Установлено, что при перемежающемся режиме S6 теплообмен частей двигателя отличается от теплообмена в квазиустановившемся режиме. Возможно увеличение температуры на интервалах холостого хода, когда мощность тепловыделения уменьшаются.

3. Установлено колебания температуры в узлах конструкции двигателя в пределах одного цикла в квазиустановившемся режиме (S6). Размах колебаний температуры ограничивается дополнительными электрическими и магнитными потерями от высших гармоник тока.

4. Используя систему уравнений теплового баланса теплового состояния асинхронного частотно-управляемого двигателя в нестационарном режиме, можно эквивалентировать по нагреву длительным режимом S1, режимы S3-S8, что позволит оптимально использовать по мощности асинхронные двигатели общепромышленного изготовления при работе в других режимах.

Список литературы: 1. Радин В.И. Электрические машины. Асинхронные машины / В.И. Радин, А.Э. Брускин, А.Е. Зорохович. – М.: "Высшая школа",

1988. – 324 с. 2. *Осташевский Н.А.* Математическая модель теплового состояния частотно-управляемого асинхронного двигателя в нестационарных режимах / Н.А. Осташевский, В.П. Шайда, А.Н. Петренко // *Электромашиностроения та електрообладнання. Міжвід. наук.-техн. журнал.* – 2010. – № 75. – С. 46-51. 3. *Гуревич Э.И.* Переходные тепловые процессы в электрических машинах / Э.И. Гуревич, Ю.Л. Рыбин. – Л.: Энергоиздат, 1983. – 216 с.

Поступила в редколлегию 24.10.2013

УДК 621.313.2

Исследование теплового состояния асинхронного частотно-управляемого двигателя при перемежающемся режиме работы S6 / Кольвах Д.В., Петренко А.Н., Петренко Н.Я. // *Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика.* – Х.: НТУ "ХПІ", 2013. – № 65 (1038). – С. 84-91. Бібліогр.: 3 назв.

У розглядаємій статті досліджено тепловий стан окремих вузлів двигуна на базі динамічної теплової схеми. На основі ЕТС складена система рівнянь теплового балансу асинхронного частотно-керованого двигуна, який працює в режимі S6, що перемежається. За допомогою системи рівнянь теоретично досліджені і експериментально підтверджені температури найбільш нагрітих вузлів двигуна АІР90LB2 і їх вплив на тепловий стан двигуна в режимі S6.

Ключові слова: перетворювач частоти, двигун, втрати, обмотка, температура, вищі гармоніки.

In our article investigated the thermal state of individual engine components based on dynamic thermal circuit. ETS is made on the basis of the system of equations of thermal balance of asynchronous frequency-controlled motor running in an interleaved mode S6. With the help of equations investigated theoretically and experimentally confirmed most of the temperature of the heated engine parts AIR90LB2 and their influence on heat lovoe state motor in S6.

Key words: inverter, motor loss, winding temperature, the higher harmonics.

М.Г. ПАНТЕЛЯТ, канд. физ.-мат. наук, ст. преп., НТУ "ХПИ"
Е.А. СЕДОВА, ст. преп., НТУ "ХПИ"

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В РОТОРЕ БЫСТРОХОДНОГО АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Выполнен численный анализ методом конечных элементов электромагнитных процессов в различных конструкциях ротора быстроходного асинхронного генератора, работающего на сеть через тиристорный преобразователь частоты. Показано, что предложенная новая конструкция машины, особенностью которой является тонкий слой меди на наружной поверхности стального ротора, не может быть рекомендована с точки зрения величин плотности тока и добавочных потерь в поверхностном слое ротора.

Ключевые слова: быстроходный асинхронный генератор, ротор, плотность тока, потери, метод конечных элементов.

Введение. В настоящее время в Украине основная часть электрической энергии вырабатывается на мощных энергоблоках тепловых и атомных электростанций с использованием крупных турбогенераторов [1, 2]. Однако, ведутся перспективные разработки, направленные на создание сравнительно небольших автономных энергоблоков, работающих на альтернативных видах топлива, таких как отходы промышленного производства [3]. На таких электростанциях предлагается использовать быстроходные асинхронные генераторы, работающие на сеть через тиристорный преобразователь частоты. Представляет значительный интерес численное моделирование электромагнитных процессов в различных конструкциях роторов таких генераторов с целью выработки рекомендаций по снижению добавочных потерь в машине.

Цель работы – компьютерное моделирование методом конечных элементов электромагнитных процессов в различных конструкциях роторов быстроходных асинхронных генераторов.

Конструкции роторов быстроходных асинхронных генераторов. В данной работе выполняется сравнительный анализ электромагнитных процессов в двух конструкциях роторов быстроходных асинхронных генераторов 1 МВт, 8000 об/мин. Расчетные схемы рассматриваемых конструкций машин приведены на рис. 1:

- Традиционная конструкция ротора (рис. 1,а), изготовленного из стали, свойства которой приведены в [4].

• Предложенная в [3] новая конструкция генератора, отличительной особенностью которой является слой меди толщиной 0,2 см на наружной поверхности ротора (подобласть 3 на рис. 1,б). Ожидалось [3], что введение тонкого слоя меди на поверхности ротора позволит снизить добавочные потери в роторе и в машине в целом.

В обоих рассматриваемых случаях диаметр ротора 31,8 см, воздушный зазор между статором и ротором – 0,3 см.

На рис. 1,а,б обозначено: 1 – ротор генератора; 2 – упрощенная модель обмотки статора машины; Г – удаленная граница с заданными на ней нулевыми граничными условиями для векторного магнитного потенциала.

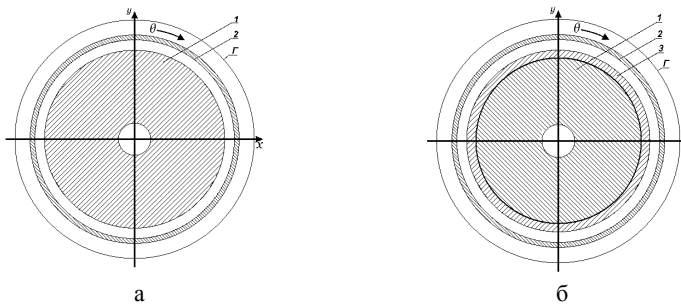


Рис. 1 – Расчетные схемы сечений рассматриваемых конструкций быстроходных асинхронных генераторов.

Методика решения задачи. Математическая модель электромагнитных процессов представляет собой систему уравнений Максвелла в дифференциальной форме без учета токов смещения [5]

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \mathbf{H} &= \mathbf{J}; \\ \operatorname{rot} \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}; \\ \operatorname{div} \mathbf{B} &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

дополненную материальными уравнениями, определяющими электрофизические свойства материалов [5]

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}; \mathbf{J} = \gamma \mathbf{E}, \quad (2)$$

где $\mathbf{H}$ – вектор напряженности магнитного поля; $\mathbf{B}$ – вектор индукции магнитного поля; $\mathbf{E}$ – вектор напряженности электрического поля; $\mathbf{J}$ – вектор плотности токов проводимости; μ – магнитная проницаемость; γ – удельная электрическая проводимость.

В настоящей работе использована методика компьютерного моделирования электромагнитных процессов в роторе турбогенератора в двухмерной постановке в декартовой системе координат [4]. Расчет электромагнитного поля выполняется в терминах векторного магнитного потенциала A , который определяется выражением [6]

$$\mathbf{B} = \text{rot} \mathbf{A} \quad (3)$$

и в решаемой задаче имеет одну осевую компоненту $A = A_z$, пространственно-временное распределение которой описывается уравнением в частных производных [4]:

$$\gamma \frac{\partial A}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) + J_0, \quad (4)$$

где A – осевая компонента векторного магнитного потенциала, Вб·м⁻¹; γ – удельная электрическая проводимость, См·м⁻¹; μ – магнитная проницаемость, Гн·м⁻¹; J_0 – плотность тока стороннего источника, А·м⁻².

Расчетные схемы роторов асинхронного генератора приведены на рис. 1. Уравнение (4) решается в системе координат, вращающейся синхронно с ротором [4], применительно к ¼ части (первый квадрант) конструкции. Соответствующие граничные условия приведены в [4].

Решение уравнения (4) позволяет определить распределение плотности вихревых токов J и добавочных потерь от вихревых токов Q (внутренних источников тепла) для последующего решения задачи теплопроводности [4]:

$$J = -\gamma \frac{\partial A}{\partial t}; \quad Q = \frac{1}{\gamma} J^2. \quad (5)$$

Задача решена в двухмерной постановке методом конечных элементов [6] с использованием программного обеспечения, написанного на языке программирования Си [7].

В подобласти 2 (рис. 1) задается бегущая волна плотности сторонних токов (первая гармоника) вида

$$J_0(t) = \sqrt{2} J_n \sin(2\pi f s t + \theta), \quad (6)$$

где $J_n = 5$ А/мм² – плотность тока статора; $f = 133,3$ Гц – частота первой гармоники, соответствующая скорости вращения ротора 8000 рад/мин; $s = 0,055$ – скольжение; θ – угол между осью Oy и лучами, проведенными в первом квадранте из начала координат через каждый узел сетки конечных элементов в подобласти 2, отсчитываемый по часовой стрелке (рис. 1) и описывающий движение бегущей волны электромагнитного поля статора в воздушном зазоре машины [4].

Численные результаты и их анализ. Результаты расчетов получены в виде пространственно-временного распределения плотности тока и добавочных потерь от вихревых токов (5) в роторах рассматриваемых конструкций. В качестве примера на рис. 2-5 приведено изменение указанных величин во времени в точке на глубине 0,1 см от поверхности ротора, т.е. посередине слоя меди в случае его наличия (рис. 1,б) и в соответствующей точке стального ротора традиционной конструкции (рис. 1,а). Рассматриваемая точка находится в первом квадранте поперечного сечения ротора на луче, проведенном под углом 45^0 к осям координат.

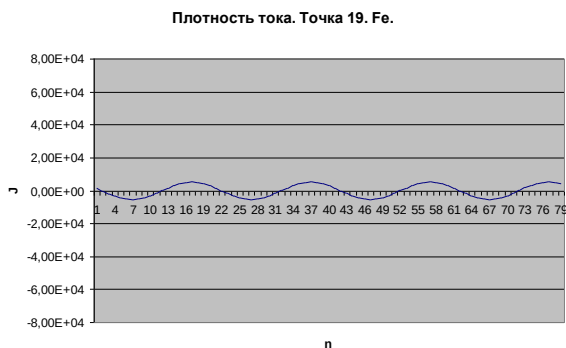


Рис. 2 – Плотность тока в роторе генератора традиционной конструкции.

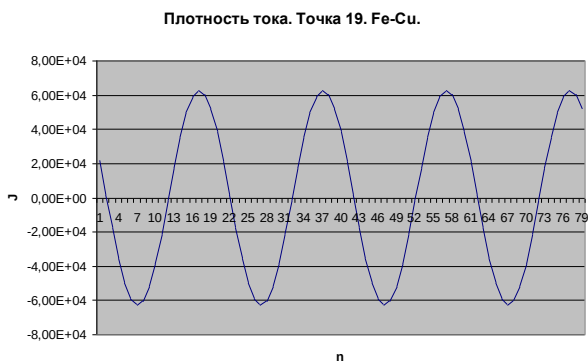


Рис. 3 – Плотность тока в роторе генератора предложенной конструкции.

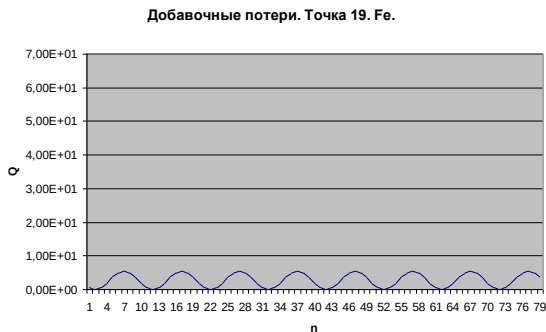


Рис. 4 – Добавочные потери в роторе генератора (рис. 1,а).



Рис. 5 – Добавочные потери в предложенном роторе генератора (рис. 1,б).

Анализ полученных результатов показывает, что плотность тока и добавочные потери в медном слое на наружной поверхности ротора новой конструкции на порядок превышают аналогичные величины в соответствующем поверхностном слое стального ротора. При этом, плотности тока и потери на больших глубинах практически одинаковы в обеих конструкциях машины.

Таким образом, на основании полученных численных результатов можно сделать вывод, что предложенная новая конструкция ротора быстроходного асинхронного генератора 1 МВт, 8000 об/мин не может быть рекомендована с точки зрения величин плотности тока и добавочных потерь в поверхностном слое ротора.

Выводы. В работе выполнен численный анализ методом конечных элементов электромагнитных процессов в различных конструкциях ротора быстроходного асинхронного генератора. Показано, что но-

вая конструкция ротора, особенностью которой является тонкий слой меди на наружной поверхности стального ротора, не может быть рекомендована, поскольку ожидаемый эффект от изменения конструкции ротора (снижение добавочных потерь в роторе и в машине в целом) не достигается.

Список литературы: 1. *Титов В.В., Хуторецкий Г.М., Загородная Г.А.* и др. Турбогенераторы. Расчет и конструкция. – Л.: Энергия, 1967. – 895 с. 2. *Хуторецкий Г.М., Токов М.И., Толвинская Е.В.* Проектирование турбогенераторов. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 256 с. 3. *Зозулин Ю.В., Лившиц А.Л., Ракогон В.Г., Шульженко Н.Г., Пантелеят М.Г., Руденко Е.К., Кузьмин В.В., Гордиенко В.Ю.* Потери в роторе быстроходного асинхронного генератора, работающего на сеть через тиристорный преобразователь частоты // Тезисы 10-й Международной научно-практической конференции "Энергоэффективность: проблемы и решения". – Коблево, Украина, июнь 2008 г. – С. 36-38. 4. *Шульженко Н.Г., Зозулин Ю.В., Пантелеят М.Г., Руденко Е.К., Петушкова С.А.* Влияние материала пазовых клиньев на распределение электромагнитного поля, плотности тока и потерь от токов обратной последовательности в роторе турбогенератора при двухфазном коротком замыкании // Электротехника и электромеханика. – 2005, № 3. – С. 61-64. 5. *Демирчян К.С.* Моделирование магнитных полей. – Л.: Энергия, 1974. – 288 с. 6. *Сильвестер П., Феррари Р.* Метод конечных элементов для радиоинженеров и инженеров-электриков. – М.: Мир, 1986. – 229 с. 7. *Керниган Б., Ритчи Д.* Язык программирования Си. – СПб.: "Невский Диалект", 2003. – 355 с.

Поступила в редколлегию 29.11.2013

УДК 621.3

Анализ электромагнитных процессов в роторе быстроходного асинхронного генератора методом конечных элементов / Пантелеят М.Г., Седова Е.А. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2013. – № 65 (1038). – С. 92-98. Бібліогр.: 7 назв.

Виконано чисельний аналіз методом скінчених елементів електромагнітних процесів в різних конструкціях ротора швидкісного асинхронного генератора, що працює на мережу через тиристорний перетворювач частоти. Показано, що запропонована нова конструкція машини, особливістю якої є тонкий шар міді на зовнішній поверхні стального ротора, не може бути рекомендована з точки зору величин щільності струму та додаткових втрат в поверхневому шарі ротора.

Ключевые слова: швидкісний асинхронний генератор, ротор, щільність струму, втрати, метод скінчених елементів.

Finite element numerical analysis of electromagnetic processes in a rotor of a high-speed inductor generator with thyristor frequency converter is carried out. It is shown that proposed new machine design with thin copper layer on the external rotor surface cannot be recommended from point of view of current density and additional losses within rotor external layer.

Keywords: high-speed induction generator, rotor, current density, losses, finite element method.



Пантелеят Михаил Гарриевич, старший преподаватель кафедры "Электрические аппараты" Национального технического университета "ХПИ". В 1985 г. закончил Харьковский политехнический институт по специальности "Инженерная электрофизика". Кандидат физико-математических наук (1991 г., специальность "Механика деформируемого твердого тела"). Основные научные интересы: компьютерное моделирование электромагнитных, тепловых и механических процессов в электромагнитных устройствах различного назначения.



Седова Елена Александровна, ст. преп. каф. "Электрические аппараты" Национального технического университета "ХПИ". Защитила диплом инженера-электромеханики в 1984 г. Научные интересы связаны с проблемами электрических аппаратов, в частности с методами контроля сопротивления контактов.

В.В. ШЕВЧЕНКО, канд.техн.наук, доц., НТУ "ХПИ"

О.П. КОШЕВОЙ, студент, НТУ "ХПИ"

КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ С ВОЗДУШНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

Турбогенераторы с воздушным охлаждением отличаются высокой надежностью, взрывобезопасностью, простотой и удобством в эксплуатации. При проектировании таких генераторов следует использовать конструктивную базу турбогенераторов с водородным и водородно-водяным охлаждением.

Ключевые слова: турбогенераторы, воздушное охлаждение, проектирование.

Введение. К числу ограничений, которые необходимо соблюдать при проектировании электрических машин (ЭМ), наряду с максимально допустимыми механическими и электрическими нагрузками, возможностью осуществления технологических операций, перспективными массогабаритными параметрами конструкций и трудоемкостью технологических операций, относятся значения допустимых температур активных элементов конструкций. Общему прогрессу электромашиностроения всегда сопутствует оценка его конкурентоспособности, одним из главных критерием которых являются тепловое состояние и обеспечение необходимой и достаточной системы охлаждения, [1].

Обеспечение максимальной эксплуатационной надежности и экономичности турбогенераторов (ТГ) является важной научно-технической проблемой электромашиностроения и, в конечном счете, является вопросом энергетической независимости государства.

Цель исследований. Основная цель, которую ставят при разработке ТГ с воздушным охлаждением – создание машин с высокими КПД, высокой надежностью, с низкими уровнями вибрации и нагрева. При этом для обеспечения экономической рентабельности производства следует максимально сохранить конструктивные решения ТГ с водородным охлаждением, что позволит использовать многие технические разработки и расчеты, использовать технологические процессы и технологического оборудования заводов-изготовителей.

Конструкции турбогенераторов с воздушным охлаждением. За последние годы конструкции ТГ были значительно изменены за счет использования новых материалов (в основном, изоляционных) и новых технологий изготовления. В дополнение к обеспечению более высоких

электромагнитных характеристик, эти технологии обеспечивают улучшенные распределения потерь, позволяют организовать более эффективную вентиляцию, снизить температуры в машине и ее вибрации. Для этого необходимы более точные методы расчетов, т.е. необходимо иметь возможность точно рассчитывать основные и добавочные потери, а также учитывать распределение температуры по объему машины.

По способу охлаждения ТГ подразделяются на машины с воздушным, с косвенным водородным, непосредственным водородным и жидкостным охлаждением. В настоящее время в Украине, как и во всем мире, отмечены тенденции перехода именно в машинах мощностью до 200-300 МВт на воздушное охлаждение, т.е. замены водорода в объеме генератора на воздух. В табл. 1 приведены данные для некоторых ТГ с воздушной системой охлаждения производства Украины (ГП завод "Электротяжмаш") и России ("Электросила", г. Санкт-Петербург) [1, 2].

Таблица 1 – Данные ТГ с воздушным охлаждением

Тип турбогенератора, завод изготовитель	Мощность		Напряжение, кВ	Частота вращения, об/мин	Частота тока, Гц	Масса, т
	МВА	МВт				
ТЗВ-320-2 УЗ "Электросила"	376	320	20	3000	50	270
ТЗФП-120-2 "Электросила"	133	120	16	3000	50	178
ТА-120-2 ГП завод "Электротяжмаш"	133	120	16	3000	50	257
ТА-160-2 ГП завод "Электротяжмаш"	174	160	20	3000	50	300,5
ТЗФП-160-2М "Электросила"	174	160	20	3000	50	243
ТЗФ-220-2 "Электросила"	242	220	20	3000	50	268
ТЗФ-350-2 "Электросила"	380	350	20	3000	50	280

Возрождение интереса к ТГ с полным воздушным охлаждением в настоящее время вызвано следующим:

1) необходимость полной модернизации современных ТЭС позволила поставить вопрос изменения комплектации станций. Поэтому для многих станций рассматривают вопрос замены паровых турбин на

газотурбинные установки. Для таких установок наиболее перспективны ТГ с полным воздушным охлаждением;

2) оценка данных о выпускаемой продукции крупнейшими электромашиностроительными заводами стран СНГ и мира позволяет сделать вывод о снижении интереса к ТГ мощностью 500 и 800 МВт и о повышенном интересе к машинам в 200-300 МВт. Поэтому модернизация, совершенствование, повышение надежности ТГ этой мощности, их перевод на воздушное охлаждение становится первоочередной задачей;

3) использование воздушного охлаждения позволит исключить из комплектации ТГ систем водородного, водяного и масляного оборудования (для уплотнения вала), упростить систему уплотнений вала. Это приведет к повышению надежности ТГ, снижению его массогабаритных показателей, повышению коэффициента готовности, (до 0,997-0,998 по сравнению с водородно-водяными ТГ, у которых коэффициент готовности равен 0,95-0,995, [5]), сокращению количества и стоимости ремонтных работ, снижению себестоимости, т.е. повышению конкурентоспособности на мировом рынке.

Турбогенераторы максимальной мощности с полным воздушным охлаждением были созданы на заводах фирм *ABB* и *ALSTOM*: в 1995 г. был создан ТГ мощностью 300 МВА, в 1999 г. – мощностью 500 МВА. С учетом конъюнктуры рынка, на заводе "Электросила" (ОАО "Силовые машины", г. Санкт-Петербург) была разработана новая серия ТГ с воздушным охлаждением для паровых и газовых турбин номинальной активной мощностью до 350 МВт (рис. 1). К настоящему моменту изготовлены и успешно эксплуатируются на местах установки около сорока ТГ этой серии. ТГ для сопряжения с паровыми турбинами изготавливаются с одним стояковым подшипником на отдельных фундаментных плитах.



Рис. 1 – Турбогенератор мощностью 160 МВт с воздушным охлаждением для газовой турбины ПГУ – 450.

Расположение газоохладителей в статоре воздушного ТГ, выполненных на конструктивной базе серии ТВВ, мощностью 165 и 200 МВт, продольно-горизонтальное. Турбогенераторы ТВВ-320-2 имеют вертикальные газоохладители. Вентиляция – вытяжная, обеспечивается вентиляторами, расположенными по торцам ротора.

По сравнению с генераторами с водородным охлаждением, ТГ с воздушным охлаждением проще в эксплуатации; но недостатком их могут оказаться повышенные механические потери, повышение температуры активных частей, а иногда и большие размеры.

Первым шагом решения проблемы снижения и более равномерного распределения температур по объему статора и ротора было бы применение метода *Taguchi* ("активный дизайн", [3]), использование которого позволит рассчитать и выбрать более эффективную вентиляцию, уменьшить диаметр ротора и механические потери. Исследования по этому методу показали, что потери в стали сердечников не всегда доминирующие; а потери во внешних конструкциях статора могут составлять значительную часть от общих потерь в стали. Соответственно, необходимо анализировать факторы влияния каждого узла и, путем выбора оптимальной комбинации параметров конструкции, свести к минимуму превышение температуры, веса и потерь. Так, например, на ГП завод "Электротяжмаш" создан "воздушный" генератор мощностью 160 МВА, с КПД 98,75 %, имеющий малый вес, уровень нагрева и высокую эффективность.

При выборе конструктивных решений ТГ с воздушным охлаждением следует предусмотреть замкнутую систему вентиляции, что позволит исключить загрязнение проходящего воздуха. Если, с целью унификации конструкции воздушного ТГ с водородным прототипом, необходимо использовать разомкнутую воздушную систему вентиляции, то, во избежание перегрева машины, следует предусмотреть меры, предотвращающие загрязнение ее вентиляционных каналов. В системе также необходимо предусмотреть систему наддува воздуха с одновременной конденсацией излишней влаги. Это позволяет отказаться от громоздких и энергоемких холодильных установок, требующих дополнительного пространства для размещения, прокладки силовых и гидравлических коммуникаций, значительных затрат на электроэнергию и обслуживание при эксплуатации.

Также необходимо предусмотреть меры по предотвращению загрязнения генератора и возбuditеля угольной пылью от контактных

колец. Воздухоохладители должны быть выполнены таким образом, чтобы машина при выводе из эксплуатации одной его части для очистки могла нести, по крайней мере, 2/3 номинальной нагрузки в течение длительного времени без превышения допустимой температуры элементов машины. Может оказаться, что при этом температура первичного охлаждающего воздуха превысит расчетное значение.

Изменяется конструкция и системы пожаротушения – при воздушном охлаждении можно ограничиться распыленной водой или инертным газом (второе, если рассматривают ТГ с водородным охлаждением, допускающие работу при воздушном охлаждении), [4].

Анализ тепловых расчетов турбогенераторов, [1, 5], выпускаемых ГП завод "Электротяжмаш", позволяет отметить, что в ТГ с водородным охлаждением существует запас по превышению температуры нагрева машины на 20-25 % по отношению к допустимой температуре нагрева принятого класса нагревостойкости изоляции. Отказ от запаса по температурным характеристикам изоляции на один класс нагревостойкости (*service – factor*), принятый еще в СССР, позволит проектировать новые воздушные ТГ с прежними, и даже большими, значениями мощности на базе ТГ с водородным охлаждением, сохраняя запас по превышению температуры в 2-4 %, что соответствует мировыми стандартами.

Одним из показателей, определяющих конкурентоспособность отечественных конструкций ТГ, является удельный вес, т.е. отношение мощности ТГ к его массе. У ТГ с водородной системой охлаждения больше масса из-за необходимости увеличения толщины стенок элементов корпуса статора для повышения безопасности их эксплуатации, [5]. В табл. 2 представлены допустимые по прочности геометрические показатели ТГ среднего класса мощности (120-320 МВт) и их масса.

Таблица 2 – Толщина элементов корпуса статора ТГ и суммарная масса ТГ.

Система охлаждения	Наружный диаметр обшивки, м	Толщина обшивки, мм	Толщина торцевых стенок, мм	Толщина поперечных стенок, мм	Опорные лапы, мм	Масса, т
Водородное	До 3,0	20	70-80	20	70	364
	Свыше 3,0	24	70-80	25-30	70	495
Воздушное	1,3	6	30-34	12-16	30-40	300,5
	1,7-2,0	8	30-34	12-16	36-42	264
	2,25-3,35	10-16	34-50	20-24	42-50	303,5

Изменение системы охлаждения, приводящее к эксплуатации обмоток ТГ с более высокими температурами, требует использования новых технологий их изготовления.

Мы рекомендуем использовать новый тип изоляции "Монолит 3", разработанный на ГП завод "Электротяжмаш", с упругим слоем, компенсирующим тепловое расширение обмотки и сердечника и обеспечивающим разборность конструкции. Другим, чрезвычайно перспективным путем совершенствования изоляции, является повышение ее теплопроводности, что достигается добавлением в эпоксидную смолу, составляющую основу фирменной изоляции "Микадур", мелкодисперсного порошка А1203. Это позволяет увеличить ее теплопроводность в два и более раза. Перспективно также для мощных ТГ типа ТЗФ использовать трехконтурную систему воздушного охлаждения, предложенную на ГП завод "Электротяжмаш", рис. 2.

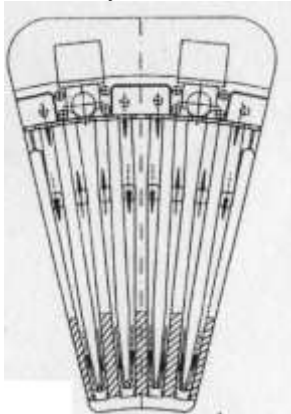


Рис. 2 – Сегмент статора ТГ на базе серии ТЗФ с трехконтурной системой воздушного охлаждения.

Улучшение характеристик, повышение КПД, надежности и перегрузочной способности достигается за счет разделения потоков воздуха, охлаждающего статор и ротор, исключения их отрицательного взаимного влияния, что позволяет снизить нагрев активных и конструктивных частей ТГ. Существенной особенностью ТГ серии ТЗФ является применение встроенных центробежных вентиляторов, снабженных специальными направляющими и спрямляющими аппаратами. Такое решение позволило снизить потери в вентиляторах и повысить КПД генераторов. ТГ серии ТЗФ мощностью 160 МВт имеет КПД 98,55 %, что выше требований ГОСТ 533-2000.

Выводы.

1) Перевод ТГ на воздушное охлаждение внутреннего объема машины возможен и целесообразен.

2) Для обеспечения надежности работы воздушных ТГ и одновременного увеличения мощности в том же габарите необходимо провести расчетные и конструктивные корректировки водородных машин, взятых за основу.

3) Для решения проблемы снижения и более равномерного рас-

пределения температур по объему статора и ротора целесообразно использовать метод *Taguchi*. Необходимо изменять (упрощать) системы вентиляции, уплотнения вала, конструкцию системы пожаротушения, использовать новый тип изоляции "Монолит 3", технологическими приемами увеличивать ее теплопроводность, использовать трехконтурную систему воздушного охлаждения, встроенные центробежные вентиляторы.

Список литературы. 1. Шевченко В.В., Минко А.Н. Развитие систем охлаждения и оптимизация конструкций турбогенераторов. – Харьков, Монограф, 2013. – 242 с. 2. Шевченко В.В., Минко А.Н. О повышении конкурентоспособности отечественных турбогенераторов // X1 міжнародна НТК, 2013. Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації. – Кременчук, КрНУ, 2013. – С. 220-221. 3. Шевченко В.В., Минко А.Н. Критерий оптимизации массогабаритных параметров конструкций турбогенераторов // Инновационные технологии в электроэнергетике и электромеханике. Сборник научно-технических трудов МК. – Воронеж, 2013. – С. 138-142. 4. ГОСТ Украины 533-2000 Турбогенераторы с воздушным охлаждением. Машины электрические вращающиеся. – Киев, 2001. – 7 с. 5. Кузьмин В.В., Шевченко В.В., Минко А.Н. Оптимизация массогабаритных параметров неактивных частей турбогенераторов. – Харьков: Монограф СПДФД Частышев А.В., 2012. – 246 с.

Поступила в редколлегию 01.10.2013

УДК 621.313.322-81

Конструктивные особенности турбогенераторов с воздушным охлаждением / Шевченко В.В., Кошевой О.П. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2013. – № 65 (1038). – С. 99-106. Бібліогр.: 5 назв.

Турбогенератори з повітряним охолодженням відрізняються високою надійністю, вибухобезпечністю, простотою та зручністю в експлуатації. При проектуванні таких генераторів треба використовувати конструктивну базу турбогенераторів з водневим і воднево-водяним охолодженням.

Ключевые слова: турбогенератор, повітряне охолодження, надійність, конструкція.

The air-cooled turbogenerators are characterized by high reliability, safety from explosions, simplicity and ease of use. In the design of such generators it is necessary to use a constructive base of hydrogen-cooled and hydrogen-water-cooled ones.

Keywords: turbogenerator, air cooling, reliability, construction.



Шевченко Валентина Владимировна, к.т.н., доцент, доцент кафедры "Электрические машины" НТУ "ХПИ". В 1977 г. в ХПИ защитила диплом инженера-физика. В 1981 защитила диссертацию в Ленинградском политехническом институте по специальности электрические машины и аппараты. Область научных интересов электроэнергетика, оптимизация параметров и технических характеристик турбогенераторов, нетрадиционная энергетика, сверхпроводимость.



Кошевой Олег Петрович, студент электромашиностроительного факультета, группы ЭМС-10Б НТУ "ХПИ". Участник Всеукраинского конкурса 2013 г. студенческих научных работ по специальности "Электротехника и электромеханика". Область интересов – конструкции, новые технологии изготовления, диагностики и эксплуатации турбогенераторов.

В.В. ШЕВЧЕНКО, канд. техн. наук, доцент, НТУ "ХПИ"

Я.Р. КУЛИШ, студентка, НТУ "ХПИ"

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАЗНЫХ ТИПОВ ГЕНЕРАТОРОВ ДЛЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК С УЧЕТОМ ДИАПАЗОНА МОЩНОСТИ

Выбор типа генератора является основным вопросом комплектации ветроэнергетических установок. В настоящее время, независимо от мощности и вида крыльчатки, практически всегда в них устанавливают асинхронные генераторы. Расширение диапазона мощностей ветроустановок требует определения типа генератора с учетом этих параметров.

Ключевые слова: асинхронный генератор, ветроэнергетическая установка, энергия ветра.

Введение. Ограниченность и неравномерность распределения ископаемых энергоносителей по земному шару с каждым годом становится все более важным. Стоит вопрос о немедленном выявлении и практическом использовании возобновляемых источников энергии (ВИЭ) для решения энергетических проблем. По оценкам Международного энергетического агентства (МЭА) первичные энергоносители, или, как принято их называть, классические источники получения энергии, составляют сегодня основу электроэнергетики всех стран. По данным МЭА электростанции работают: на нефти – 38 %, на природном газе – 20 %, на угле – 27 %, что составляет 85 % от общей выработки энергоресурсов. Остальные 15 % приходятся на АЭС и на электростанции, работающие от возобновляемых источников энергии. Повышению интереса к ВИЭ способствовало также подорожание с 70-х годов 20 века энергоносителей (особенно нефти), которое, в свою очередь, вызвало сокращение использования минеральных топливных ресурсов для выработки электроэнергии. Объем добычи и цены на энергоносители в значительной мере определяют тенденцию развития энергетики мира. Кроме того, тепловая и атомная энергетика вызывает значительные нарушения в окружающей природной среде, а увеличение масштабов производства электроэнергии на базе органического топлива может привести к глобальным экологическим последствиям для всей планеты. Все это способствует повышению интереса к ВИЭ.

Западная Европа быстрыми темпами развивает энергетику на возобновляемых и неисчерпаемых источниках – альтернативную энерге-

тику, ключевая роль в которой принадлежит ветроэнергетике, как самому дешевому способу получения энергии среди возобновляемых источников. Для Украины также наиболее перспективным направлением альтернативной энергетики является ветроэнергетика.

Рентабельность ветроэнергетической установки (ВЭУ), значение КПД зависят не столько от конструкции лопастей и другого оборудования, но от правильности выбора электрогенератора.

Цель исследований – проанализировать возможные типы электрических машин, которые можно использовать, как генераторы, преобразующие механическую энергию ветра в электроэнергию с учетом значения мощности ВЭУ.

Определение типа ветрогенератора. Для работы на единую энергосеть необходимы ВЭУ большой мощности, в несколько МВт. Для поддержания уровня жизни в мелких населенных пунктах и в единичных хозяйствах необходимо создавать системы малых энергоустановок. По опыту развитых стран известно, что суточная потребность семьи в сельской местности составляет до 2 кВт·час, достаточно крупного фермерского хозяйства – до 10 кВт, небольшой деревни (до 50 семей) – 50 кВт·час. Малая ветроэнергетика не требует больших территорий. Локальные ветроэнергетические установки (ВЭУ) могут быть установлены практически везде, где среднегодовая скорость ветра не менее 4-5 м/с, а для тихоходных многолопастных ВЭУ – не менее 3 м/с, [1].

К основным проблемам создания и эксплуатации ВЭУ относятся их эффективность, безопасность и надежность, влияние на окружающую среду, а к основным техническим решениям – выбор расчетных параметров ВЭУ, аэродинамического профиля ветроколеса, конструктивных и компоновочных решений основных узлов, методов и способов монтажа. Выбор расчетных параметров для каждой конкретной ветроустановки заключается в определении расчетной скорости ветра, единичной мощности и размеров ветроколеса, установленной мощности и типа электрической машины, определения системы регулирования, условий монтажа и эксплуатации ВЭУ. Таким образом, выбор типа генератора для ВЭУ следует отнести к важнейшим вопросам ветроэнергетики.

Определением типов генераторов для ВЭУ занимались многие известные ученые: Балагуров В.А., Вольдек А.И., Данилевич Я.Б., Леодовской А.Н., Завалишин Д.А., Сидельников Б.В. и др. Генератор является важнейшим элементом электрооборудования автономной энергоустановки. Кроме основного назначения генератор должен выпол-

нять определенные функции по стабилизации и регулированию параметров, характеризующих качество вырабатываемой электроэнергии.

Подобные работы ведутся учеными всего мира. В Греции (г. Афины) исследуют возможность использования асинхронизированного генератора двойного питания; в Великобритании (г. Ноттингем) – коммутируемый реактивный синхронный генератор; в Нидерландах и Шотландии исследуют управляемый реактивный синхронный генератор для безредукторной установки; в Японии (г. Хатинойе) – работу асинхронного генератора с короткозамкнутым ротором, оснащенного системой тиристорного управления реактивной мощностью в цепи статора и т.д. [2]. Но почти все генераторы этих типов в Украине не имеют баз производства и, при современном состоянии экономики, к промышленному выпуску могут быть предложены только после подробного анализа.

Необходима серьезная аргументация выбора типа генератора, т.к. выбор потребует значительных материальных вложений в организацию их производства: научных разработок, создания новых технологических процессов и оснастки, испытательных стендов, подготовки инженерно-технического персонала и рабочих. Поэтому для Украины, на наш взгляд, более приемлемо использование классических типов генераторов или генераторов специального, но более традиционного, исполнения, что тоже является определяющим фактором выбора типа генератора.

Для применения на ВЭУ возможны следующие типы генераторов:

- 1) асинхронные генераторы с к.з. ротором;
- 2) синхронные генераторы с электромагнитным возбуждением;
- 3) асинхронизированный синхронный генератор;
- 4) асинхронные генераторы с фазным ротором;
- 5) синхронные генераторы (СГ) с магнитоэлектрическим возбуждением, т.е. с возбуждением от постоянных магнитов.
- 6) Специальные СГ: индукторные СГ, генераторы с когтеобразным ротором и некоторые другие.

Каждый из указанных типов генераторов имеет преимущества и недостатки. Приведем краткий перечень этих факторов для каждого типа машин, табл.

Таблица – Сравнение разных типов генераторов для ВЭУ

№ пп	Тип генератора	Преимущества	Недостатки
1	АГ с к.з. ротором	1) простота и надежность в обслуживании; 2) невысокая стоимость; 3) имеют сравнительно малые колебания генерируемой мощности, электромагнитного момента и тока при параллельной работе и при переменной скорости ветра и его порывах. 4) возможно устанавливать безредукторные установки с хорошими массогабаритными показателями, высоким КПД и возможностью регулировать напряжение и его частоту в широких пределах.	1) необходимость установления редукторов, т.к. используют дешевые тихоходные турбины (с частотой вращения 20-30 об/мин). Поэтому генератор присоединяют через редуктор с высоким коэффициентом преобразования ($K_{ред}=50-70$), что требует дополнительных расходов на установку, обслуживание, ремонт, снижает надежность, является источником механического шума. 2) невозможно управлять режимными параметрами, что необходимо при порывистом ветре; 3) для работы в автономном режиме необходим автономный источник реактивной мощности; 4) ограничение в промышленном применении из-за искаженной формы выходного напряжения и неудовлетворительных динамических свойств.
2	СГ с магнитоэлектрическим возбуждением	1) исключение скользящего контакта, 2) высокая надежность работы, 3) высокое значение КПД.	1) необходимость в приобретении дорогих постоянных магнитов, технология которых до конца в Украине не отработана. 2) постоянство магнитного потока, невозможность его регулировать. 3) высокая стоимость. 4) отсутствие отечественной базы производства.

№пп	Тип генератора	Преимущества	Недостатки
3	АГ с фазным ротором	1) Возможно использовать в автономных системах в сочетании с другими машинами. Возможно каскадное соединение двух АГ или соединение АГ и ДПТ с параллельным возбуждением. 2) простота в обслуживании; 3) надежность, 4) имеют сравнительно малые колебания генерируемой мощности, электромагнитного момента и тока при параллельной работе, при переменной скорости ветра и его порывах.	1) необходимость установления редукторов, т.к. используют дешевые тихоходные турбины (с частотой вращения 20-30 об/мин). Необходим редуктор с высоким коэффициентом преобразования ($K_{ред}=50-70$), что требует дополнительных расходов на установку, обслуживание, ремонт, снижает надежность, является источником механического шума. 2) невозможно управлять режимными параметрами, что бывает необходимо при порывистом ветре; 3) в автономном режиме необходим автономный источник реактивной мощности; 4) ограничение в промышленном применении из-за искаженной формы выходного напряжения и неудовлетворительных динамических свойств. 5) наличие скользящего контакта, что снижает надежность.
4	Специальные СГ с магнитоэлектрическим возбуждением	1) исключение скользящего контакта; 2) просты и удобны в эксплуатации, высокое КПД; 3) сохраняют устойчивые рабочие характеристики на протяжении не менее десяти лет.	1) необходимость в приобретении дорогих постоянных магнитов, технологии которых до конца в Украине не отработана; 2) постоянство магнитного потока, т.е. невозможность его регулировать; 3) высокая стоимость генераторов; 4) отсутствие отечественной базы производства

№пп	Тип генератора	Преимущества	Недостатки
5	СГ с электромагнитным возбуждением	1) При применении преобразователя с явным звеном постоянного тока и инвертором напряжения при широтно-импульсном управлении, возможно получить в токе низкий состав гармоник, улучшение динамических свойства объекта; 2) возможность управления реактивной мощностью с генераторной стороны.	1) выше стоимость, сложнее конструкция, ниже надежность, чем у АМ; 2) наличие скользящего контакта и необходимость источника постоянного тока для обмотки возбуждения; 3) при необходимости безредукторной установки усложняется конструкция, увеличивается вес и цена; 4) жесткая зависимость частоты ЭДС от скорости вращения. Это ограничивает, а в регионах с резкими порывами ветра делает невозможным, использование СГ для прямого включения в сеть без ППЧ. 5) Для обеспечения параметров тока и напряжения с допустимыми техническими характеристиками необходимо применять преобразователи с явным звеном постоянного тока и инвертором напряжения.
6	Асинхронизированный синхронный генератор	1) Возможно использовать в автономных системах в сочетании с другими машинами. Возможно каскадное соединение с АГ или соединение с АГ и ДПТ с параллельным возбуждением. 2) Большая устойчивость.	1) наличие на роторе скользящего контакта для подвода напряжения к обмотке возбуждения ротора и необходимость в преобразователе частоты для регулирования напряжения возбуждения; 3) при отклонении скорости от синхронной требуется значительное увеличение реактивной мощности и напряжения в обмотке возбуждения. 4) при приближении скольжения к нулю и несинусоидальности в выпрямителе, питающем обмотку возбуждения, в напряжении генератора возникают значительные субгармоники, а при параллельной работе и регулировании напряжения по величине и фазе скольжения, в вырабатываемом напряжении возникают пульсации, практически повторяющие пульсации момента ветротурбины

Направление ветра обычно не столь существенно с точки зрения эффективности работы ВЭУ. Однако в различных ландшафтах ветры разных румбов имеют неодинаковую порывистость и скорость. Их повторяемость определяют по розе ветров. Угловые градиенты скорости существенно влияют на работу механизмов автоматической ориентации и на величину гироскопических нагрузок. Мощность ВЭУ:

$$P = C_P \cdot \frac{\rho v^3}{2} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \eta_{эл} \cdot \eta_{мех}, \text{ Вт.} \quad (1)$$

Согласно мнению многих исследователей, (EWEA, 1991; Андерсон, 1992, *Beurskens and Jensen*, 2001), если известно среднее значение скорости ветра на площадке установки ветротурбин, то для ориентировочного расчета количества вырабатываемой электроэнергии в год (Э, кВт·час) используем формулу:

$$\mathcal{E} = K \cdot V_m^3 \cdot A_t \cdot N; \text{ кВт·час,} \quad (2)$$

где $K = 3,2$ – численный коэффициент, полученный для типичных характеристик работы ветрогенератора, знания приблизительного значения средней скорости и частоты изменения скорости ветра; V_m – среднегодовая скорость ветра через сечение поверхности, образуемой лопастями ветротурбины, м/с; A_t – сечение поверхности, образуемой лопастями ветротурбины, м²; N – число ВЭУ, шт.

Вырабатываемая генератором активная мощность P прямо пропорциональна КПД генератора и ветроустановки, зависит от плотности воздуха, которая изменяется сезонно и зависит от давления и температуры, коэффициента мощности ветроустановки C_P , а также находится в кубической зависимости от скорости ветра v и в квадратичной зависимости от диаметра ветроколеса D .

При рассмотрении энергетических соотношений условимся пренебрегать потерями в системах и примем коэффициент мощности $\cos\varphi = \text{const}$. Уравнения баланса мощностей для автономной системы электроснабжения с асинхронным генератором с самовозбуждением при включении конденсаторов в цепь статорной обмотки представим в виде:

$$m_1 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos\varphi_1 = m_1 \cdot U_1 \cdot I \cdot \cos\varphi_1. \quad (3)$$

Запишем далее уравнения баланса реактивных мощностей при активно-индуктивной или активной нагрузке и при использовании в генераторной установке только шунтирующих конденсаторов или шунтирующих и компаундирующих конденсаторов.

$$m_1 \left[\frac{I_k^2}{\omega_1 \cdot C} - I^2 \cdot \omega_1 \cdot L \right] = Q_{\Delta Г}; \quad (4)$$

$$m_1 \cdot \frac{I_k^2}{\omega_1 \cdot C} = Q_{AG}; \quad m_1 \cdot \frac{I_k^2}{\omega_1 \cdot C} + m_1 \cdot I^2 \cdot \left[\frac{1}{\omega_1 \cdot C_k} - \omega_1 \cdot L \right] = Q_{AG};$$

$$\frac{m_1}{\omega_1} \cdot \left[\frac{I_k^2}{C} + \frac{I_k^2}{C_k} \right] = Q_{AG};$$

где I_1, I, I_k – токи фазы генератора, нагрузки и шунтирующих конденсаторов, А; ω_1 – угловая частота напряжения генератора; L – индуктивность фазы нагрузки; C, C_k – емкость шунтирующих и компаундирующих конденсаторов; φ_1, φ – фазовые углы сдвига генератора и нагрузки; m_1 – количество фаз генератора; $m_1 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 = P_{эм}$ – электромагнитная мощность генератора, Вт; Q_{AG} – реактивная мощность генератора, определяемая из соотношения:

$$m_1 U_1 \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_1 = Q_{AG}$$

Уравнения баланса реактивной мощности применимы для автономной системы лишь в том случае, если для выравнивания частоты у потребителей автономной системы не применяется вставка выпрямитель-инвертор. Если данная вставка есть, то балансы реактивной мощности составляются отдельно для АГ с целью его возбуждения и для автономной электрической сети с целью обеспечения прилежного качества электроэнергии путем компенсации реактивной мощности.

При совместной параллельной работе генераторов на активно-индуктивную нагрузку их активные мощности суммируются, а реактивная мощность системы становится равной суммарной реактивной мощности шунтирующих и компаундирующих конденсаторов.

Для работы любой асинхронной машины в генераторном режиме необходим источник реактивной мощности. Значение емкости, необходимой для возбуждения генератора при данной частоте:

$$C = \frac{1}{\left[(2\pi \cdot f_1)^2 \cdot (L_1 + L_m) \right]}$$

где L_1 и L_m – соответственно индуктивность обмотки статора и намагничивающего контура генератора, Гн.

В общем случае, емкость, необходимая для получения напряжения на генераторе при значении нагрузки, определяется:

$$Q_C = m_1 U_c^2 / X_C = Q_\Gamma + Q_n = P_\Gamma \operatorname{tg} \varphi_\Gamma + P_n \cdot \operatorname{tg} \varphi_n, \text{ вар.}$$

Принимая $P_\Gamma = P_n = P_{ном}$ и выражая

$$X_C = 1 / (\omega_1 C) = 1 / (2\pi f_1 C), \text{ Ом,}$$

получим окончательное значение емкости, необходимой для работы асинхронного генератора с переменной частотой вращения приводного

двигателя:

$$C = P_{\text{ном}} \cdot (\text{tg}\varphi_{\text{г}} + \text{tg}\varphi_{\text{н}}) / (2\pi f_1 \cdot m_1 \cdot U_c^2), \Phi.$$

где $P_{\text{ном}}$ – мощность, отдаваемая генератором, Вт; U_c – напряжение на конденсаторах, В; f_1 – частота вырабатываемого тока, Гц; $\varphi_{\text{г}}$ и $\varphi_{\text{н}}$ – углы сдвига фаз между напряжением $U_{\text{г}} = U_c$ и токами генератора и нагрузки.

Автономные АГ целесообразно использовать при значениях

$$n_{\text{г}} / n_{\text{ном}} \geq 0,9.$$

При меньших $n_{\text{г}}$ требуемая емкость быстро возрастает и генератор почти полностью загружается реактивным током.

Из уравнения (4) – баланса реактивной мощности для активно-индуктивной нагрузки, – можно найти зависимость угловой частоты вращения вектора напряжения: $f = \omega_1 / (2\pi)$ с частотой f в сети.

АГ допускают относительно простую параллельную работу в отличие от синхронных генераторов, (СГ), требующих при параллельном включении строгой синхронизации частоты вращения. У параллельно работающих АГ частоты вращения могут различаться, при этом в общей цепи статорных обмоток создается ток такой частоты, которая соответствует резонансу в полной эквивалентной схеме, включающей, помимо цепи нагрузки и конденсаторной батареи, цепи объединенных статорных и роторных обмоток генераторов с соответствующими активными и реактивными сопротивлениями.

АГ находят ограниченное применение в относительно маломощных источниках тока в автономных энергоустановках. При некоторых условиях возможна работа в режиме АГ мощных турбогенераторов. Перспективы совершенствования АГ и их более широкого внедрения связаны с проводимой в настоящее время разработкой высокоэффективных легких конденсаторов.

Выводы. 1. Многие страны последние 20-25 лет уделяют особое внимание развитию нетрадиционных способов получения энергии, и в частности, использованию энергии ветра. Расширение использования ВЭУ может идти в направлениях:

- обеспечение электроэнергией различных малых объектов. Мощность таких ВЭУ должна быть в пределах 25-100 кВт;
- обеспечение совместной работы с существующими энергосистемами традиционной энергетики. Мощность таких ВЭС может определяться в интервале 3-15 МВт;
- снабжение электроэнергией промыслов нефтегазовой отрасли, удаленных от центральных систем энергоснабжения. Для этих целей пригодны передвижные и стационарные ВЭУ мощностью 100-1000 кВт.

2. Установлено, что в автономных электрических сетях, при использовании ВЭУ мощностью до 200 кВт, рекомендуется применение синхронных генераторов (СГ) с постоянными магнитами (СПМ), которые имеют преимущества по надежности, экономическим показателям и КПД. Этому способствует создание нового поколения постоянных магнитов с высокими технико-экономическими показателями, имеющих высокую коэрцитивную силу и возможность долго ее сохранять. Такие магниты позволяют получить в рабочей зоне (воздушном зазоре) значение магнитной индукции до 0,8-0,9 Тл, что в некоторых случаях даже превышает значение индукции, получаемое при электромагнитном возбуждении.

3. Классические по конструкции СГ с электромагнитным возбуждением устанавливаются на установках либо малой, либо очень большой мощности. Технология изготовления и опыт расчета таких машин позволяет устанавливать мощные безредукторные установки (мощностью до 2 МВт) с хорошими массогабаритными показателями, высоким КПД и возможностью регулировать напряжение в широких пределах за счет изменения тока возбуждения.

4. У СГ существует жесткая зависимость частоты генерируемой ЭДС от скорости вала. Если ветер нестабилен, то в генераторе появляются высокие значения переменных составляющих в режимных параметрах, ухудшается работа таких генераторов параллельно с сетью. Это ограничивает, а в регионах с резкими порывами ветра делает невозможным, использование СГ для прямого включения в сеть. При такой работе между генератором и сетью устанавливают полупроводниковый преобразователь частоты.

5. Асинхронизированные синхронные генераторы (АСГ) находятся скорее в стадии разработки, чем в стадии промышленного применения. У АСГ к симметричному в магнитном отношении ротору, через три кольца, к трехфазной (иногда, двухфазной) обмотке возбуждения подводят напряжение, величина и фаза которого изменяется пропорционально скольжению. Регулирование напряжения возбуждения осуществляется за счет преобразователя частоты.

6. Несмотря на внимание к вопросам ветроэнергетики в целом и, в частности, к генераторам ВЭУ, окончательного ответа на вопрос об оптимальном типе генератора для каждого отрезка достигнутых мощностей нет.

Список литературы. 1. Сидельников Б.В. Современное состояние и сравнительный анализ конструктивных схем ветрогенераторов. // Вестник Щецин-

ского технического университета, Польша, 2001. 2. Ass Ext., Hall D. Renewable Energy. Power for a Sustainable Future. // Oxford Unit. Press, 1996. – 478 p. 3. Шевченко В.В., Лизан И.Я. Проблемы, перспективы и основные направления развития экологически чистых источников электроэнергии в Украине // Якість технологій та освіти. Збірник наукових праць. – Вип. 1. – Х.: УНПА, 2011. – С. 77-87.

Поступила в редколлегию 22.10.2013

УДК 621.311.245

Анализ возможности использования разных типов генераторов для ветроэнергетических установок с учетом диапазона мощности / Шевченко В.В., Кулиш Я.Р. // Вісник НТУ "ХПИ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПИ", 2013. – № 65 (1038). – С. 107-117. Бібліогр.: 3 назв.

Вибір типу генератора є основним питанням комплектації вітроенергетичних установок. В даний час, незалежно від потужності і виду крильчатки, практично завжди в них встановлюють асинхронні генератори. Розширення діапазону потужностей вітроустановок вимагає визначення типу генератора з урахуванням цих параметрів.

Ключові слова: турбогенератор, вітроенергетична установка, діапазон потужності.

Select of the generator type is a major issue in the preparation of the complete set of wind-driven power plants. Currently, independently on the power and type of impeller, practically always asynchronous generators are mounted in them. Extending the wind-driven power plants' power range requires determining the type of generator taking these parameters into account.

Key words: type of generator, wind-driven power plant, power range.



Шевченко Валентина Владимировна, к.т.н., доцент, доцент кафедри "Електрические машины" НТУ "ХПИ". В 1977 г. в ХПИ защитила диплом инженера-физика. В 1981 защитила диссертацию в Ленинградском политехническом институте по специальности электрические машины и аппараты. Область научных интересов электроэнергетика, оптимизация параметров и технических характеристик турбогенераторов, нетрадиционная энергетика, сверхпроводимость.



Кулиш Яна Романовна, студентка электромашиностроительного факультета, группы ЭМС-11А НТУ "ХПИ". Область интересов – электроэнергетика от возобновляемых источников, ветроэнергетика, конструкции и эксплуатация ветрогенераторов.

К.В. ДУБОВЕНКО, д-р техн. наук, доцент, МНАУ, Миколаїв
Д.О. ЗАХАРОВ, асистент, МНАУ, Миколаїв

**МОДЕЛЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРИЧНОГО
ПОЛЯ В ГЕТЕРОГЕННОМУ СЕРЕДОВИЩІ ТВЕРДА
ФАЗА – ГАЗ ЗА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО ВИЗНАЧЕНОЮ
ДІЕЛЕКТРИЧНОЮ ПРОНИКНІСТЮ**

Обґрунтовано обчислення діелектричної проникності твердої фази гранульованого гетерогенного середовища за даними експериментальних вимірювань діелектричної проникності його насипної маси. На основі виконаного аналізу розраховано характеристики електричного поля в об'ємі гетерогенного середовища, необхідні для визначення умов стійкої генерації коронних розрядів

Ключові слова: моделювання, електричне поле, гетерогенне середовище

Вступ. Характеристики багатьох технологічних процесів, заснованих на перетворенні енергії електромагнітного поля в неоднорідних середовищах, суттєво залежать від їх структури. Для середовищ, які мають діелектричні властивості, найважливішою характеристикою є діелектрична проникність. Окремим класом неоднорідних середовищ є гранульовані середовища з практично однаковою формою твердих часток – гранул штучного або біологічного походження, які мають симетрію, близьку до аксіальної. В своїй масі гранули утворюють між собою проміжки (пори), заповнені газом або рідиною. Таке гетерогенне середовище є двофазним. В даній роботі як гетерогенне середовище розглядається насипна зернова маса, що є об'єктом бактерицидного та інсектицидного знезараження високочастотним ($f < 1$ МГц) коронним розрядом.

Мета дослідження полягала у визначенні розподілу напруженості електричного поля в гетерогенному середовищі на основі обчислення відносної діелектричної проникності його твердої фази, що необхідно для виконання аналізу умов стійкої генерації коронних розрядів.

Аналіз сучасного стану проблеми. В роботах [1, 2] обґрунтовано перспективи застосування високочастотного коронного розряду для знезараження об'ємів зернової маси. Проте для широкого впровадження такої технології необхідно виконати комплекс досліджень. На рис. 1, а наведена характерна картина рівномірного світіння коронного розряду в об'ємі гетерогенного середовища (зернової маси). В такому ре-

© К.В. Дубовенко, Д.О. Захаров, 2013

жимі відбувається інтенсивна генерація озону, а температура об'єму в процесі обробки не перевищує припустимих значень. Порушення умов розвитку коронного розряду і контракція плазмового каналу (рис. 1, б) призводять до нерівномірного виділення енергії в об'ємі, зниження концентрації озону в камері обробки, а канал дугового розряду в цьому випадку палить зерно.

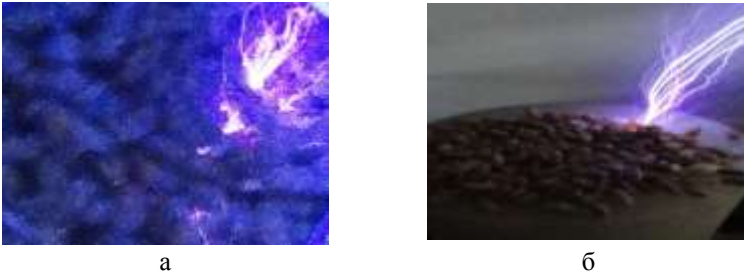


Рис. 1 – Утворення розрядів в гетерогенному середовищі:
а – височастотний коронний розряд; б – височастотний дуговий розряд.

Для з'ясування умов стійкого формування коронних розрядів в об'ємі гетерогенного середовища, необхідно знати розподіл напруженості електричного поля в ньому. Вирішення цієї задачі вимагає узагальнення відомих експериментальних даних про електрофізичні властивості зернової маси в залежності від її вологості, температури, насипної густини.

В останнє десятиріччя науковцями різних країн виконано комплекс досліджень, спрямованих на визначення електрофізичних властивостей гетерогенних гранульованих середовищ з використанням методів, побудованих на законах електростатичного поля, електромагнітної індукції, мікрохвильової та лазерної діагностики, рефлектومتрії [3-5]. Так, в роботі [3] експериментально визначено ефективну відносну діелектричну проникність зернової маси пшениці для різних значень її насипної густини та вологості. Такі дані необхідні і широко застосовуються для побудови автоматизованих систем реєстрації та контролю вологості зернової маси в зерносховищах, елеваторах, силосах. Результати цієї роботи свідчать також про те, що ефективна відносна діелектрична проникність зернової маси практично не залежить від частоти електричного поля в діапазоні до одного мегагерца.

Експериментальними дослідженнями встановлено, що на властивості гетерогенних середовищ (електропровідність, діелектричну проникність) в значній мірі впливає не тільки об'ємне співвідношення фаз

гетерогенної речовини, але й форма частинок твердої фази [4, 5]. Цей ефект вивчався теоретично в роботах [6-10], в яких показано, що в електричних полях форма частинок впливає на поляризацію речовини твердої фази. Кількісно поляризацію речовини можна характеризувати коефіцієнтом деполаризації N_j , який визначається розмірами осесиметричних часток за напрямками декартової системи координат $j = x, y, z$, які є осями обертання. Коефіцієнт деполаризації дозволяє визначити, наскільки наведена поляризація буде зменшена відповідно до форми часток та їх орієнтації у просторі відносно прикладеного електричного поля.

В роботі [6] обґрунтовано вираз для коефіцієнта деполаризації

$$N_j = \int_0^{\infty} \frac{(abc)du}{2(u+i^2)\sqrt{(9u+a^2)(u+b^2)(u+c^2)}}, \quad (1)$$

де $N_x + N_y + N_z = 1$.

Згідно даним робіт [7-9] можна виділити три характерні форми часток твердої фази з аксіальною симетрією: сферична, коли розміри гранульованих часток за трьома координатами є однаковими, тоді $N_a = N_b = N_c = 0,333$; дископодібна, якщо розміри часток за двома координатами значно переважають розміри за третьою координатою; голкоподібна, у випадку, коли розміри часток за однією координатою деполаризації набагато переважають розміри за двома іншими координатами. Зернина пшениці має форму, близьку до форми еліпсоїду обертання, тобто її форма є перехідною до голкоподібної. Залежності значень коефіцієнтів деполаризації від співвідношення розмірів частинок за двома осями координат x і y , отримані інтегруванням виразу (1), мають вигляд [9]

$$N_x = \frac{1}{1 + 1,6\left(\frac{a}{b}\right) + 0,4\left(\frac{a}{b}\right)^2}; \quad N_y = N_z = 0,5(1 - N_x), \quad (2)$$

де a і b – відповідно напрямом x , y довжина та діаметр зернини.

Виклад теоретичного матеріалу. Визначення коефіцієнтів деполаризації дозволило отримати співвідношення для розрахунку ефективної діелектричної проникності двохфазного гранульованого середовища в залежності від об'ємного вмісту твердої фази. В роботі [9] наведено залежність, в якій математично пов'язано ефективне значення відносної діелектричної проникності двокомпонентної суміші ϵ_{ef} із значеннями відносних діелектричних проникностей її компонент з урахуванням геометричної форми елементів компоненти твердої фази.

$$\varepsilon_{\text{еф}} = \varepsilon_0 + \left\{ \left[\sum_{j=x,y,z} \frac{\gamma(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)(\varepsilon_2 + v(\varepsilon_{\text{еф}} - \varepsilon_2))}{3(\varepsilon_2 + v(\varepsilon_{\text{еф}} - \varepsilon_2) + N_j(\varepsilon_1 - \varepsilon_2))} \right] \times \right. \\ \left. \times \left[1 - \sum_{j=x,y,z} \frac{\gamma \cdot N_j(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{3(\varepsilon_2 + v(\varepsilon_{\text{еф}} - \varepsilon_2) + N_j(\varepsilon_1 - \varepsilon_2))} \right]^{-1} \right\}, \quad (3)$$

де $\varepsilon_{\text{еф}}$ – ефективна відносна діелектрична проникність гетерогенного середовища (зернової маси); γ – об’ємна частина твердої субстанції в гетерогенному середовищі; v – величина когерентного потенціалу ($v = 1$ згідно роботі [10]); ε_1 – відносна діелектрична проникність твердої фази (зернової субстанції); ε_2 – відносна діелектрична проникність повітря ($\varepsilon_2 = 1$); N_j – фактор деполяризації за координатами x, y, z , який визначається згідно [9] виразом (2).

Проте для обчислення розподілу напруженості електричного поля в об’ємі гетерогенного середовища необхідно оперувати не значеннями його ефективної відносної діелектричної проникності, а значеннями відносної діелектричної проникності твердої фази (зернової субстанції) та повітря, що заповнює проміжки між зернами. Тобто суть проблеми, що вирішується, полягає у визначенні діелектричної проникності твердої фази за експериментально отриманими значеннями ефективної діелектричної проникності гетерогенного середовища із заданою густиною насипної маси з використанням співвідношення (3). Для цього необхідно спочатку визначити об’ємний вміст твердої фази на основі даних про насипну густину середовища для значень якої експериментально визначено ефективну діелектричну проникність $\varepsilon_{\text{еф}}$.

Маса двохфазного гетерогенного середовища m визначається як маса його складових речовин $m = m_1 + m_2$ або $\rho V = \rho_1 V_1 + \rho_2 V_2$, де індекс 1 відноситься до твердої, а індекс 2 – до газової фази.

З урахуванням співвідношення $V_2 = V - V_1$, визначимо відносний об’ємний вміст твердої фази γ як

$$\gamma = \frac{V_1}{V_2} = \frac{\rho - \rho_2}{\rho_1 - \rho_2}. \quad (4)$$

Пікнометричні дослідження, виконані в роботі [11], свідчать про те, що на густину зернової субстанції пшениці ρ_1 практично не впливають температура і вологість, густина зернової субстанції пшениці різних сортів відрізняється незначно, в межах одного відсотка, а її середнє значення дорівнює $1,45 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$.

З урахуванням цього і з використанням експериментально отриманих значень ефективної діелектричної проникності $\epsilon_{\text{еф}}$ насипної зернової маси із співвідношення (3) в даній роботі було обчислено діелектричну проникність зернової субстанції ϵ_1 . Результати обчислень ϵ_1 для значення вологості насипної зернової маси 19% і різних значень її густини в діапазоні від 758 до 818 $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$ наведено на рис. 2.

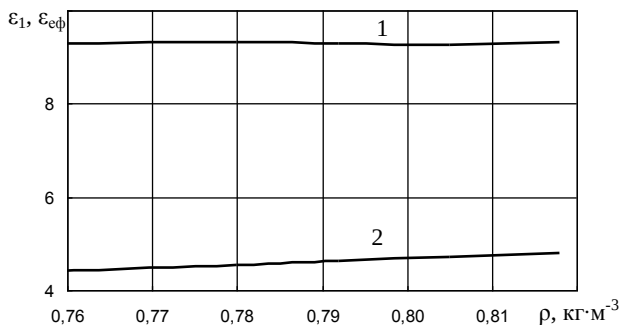


Рис. 2 – Результати обчислення діелектричної проникності твердої фази ϵ_1 (1) за даними експериментальних вимірювань [3] ефективної діелектричної проникності $\epsilon_{\text{еф}}$ гетерогенного середовища різної густини (2).

Те, що розраховані значення діелектричної проникності зернової субстанції практично не залежать від змінного параметру ρ , свідчить з одного боку про вірність виконаних в цій роботі обчислень, а з іншого – про належну точність експериментального вимірювання еквівалентної діелектричної проникності насипної зернової маси в роботі [3].

В реальних умовах виникає необхідність обробки коронним розрядом зернової маси різної вологості. Тому для визначення умов генерації коронного розряду в зерновій масі необхідно знати залежність діелектричної проникності зернової субстанції ϵ_1 від цього параметру. Результати обчислень значень ϵ_1 за даними експериментальних вимірювань ефективної діелектричної проникності $\epsilon_{\text{еф}}$ зернової маси різної вологості наведено на рис. 3. Отримані дані свідчать про те, що в діапазоні зміни значень вологості насипної маси від 9 % до 20 % густиною 786 $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$ відносна діелектрична проникність зернової маси $\epsilon_{\text{еф}}$ змінюється в інтервалі від 3,32 до 4,43, а діелектрична проникність зернової субстанції ϵ_1 змінюється в інтервалі від 6,24 до 8,92 для усереднених значень співвідношення довжини зернин a до діаметру b , що відповідає усередненим розмірам зерен пшениці [7].

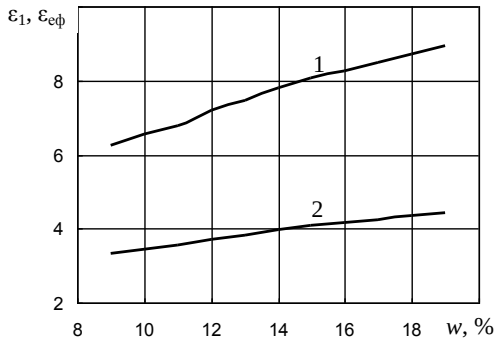


Рис. 3 – Залежності діелектричної проникності від вологості: 1 – розрахункові значення діелектричної проникності ϵ_1 зернової субстанції пшениці; 2 – значення діелектричної проникності насипної зернової маси $\epsilon_{\text{еф}}$, отримані експериментально в роботі [3] і використані тут для визначення ϵ_1 .

Результати виконаних розрахунків використано для визначення розподілу напруженості електричного поля в об'ємі зернової маси з використанням програмного пакету FEMM 4.2. Розв'язок проблеми теорії електричного поля можна сформулювати як знаходження функції скалярного електричного потенціалу, що задовольняє диференціальному рівнянню в часткових похідних другого порядку еліптичного типу в декартовій системі координат

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) = 0, \quad (5)$$

де φ – електричний потенціал; $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$ – діелектрична проникність; x, y – декартові координати; ϵ_0 – електрична стала; ϵ_r – відносна діелектрична проникність; індекс $r = 1, 2$ відповідно для твердої і газової фази гетерогенного середовища.

Умови формування коронного розряду в міжелектродному проміжку визначаються характером розподілу в ньому напруженості електричного поля. За відомим розподілом потенціалу вектор напруженості електричного поля $\vec{E}$ та його модуль знаходяться з використанням рівнянь (6), (7).

$$\vec{E} = -\text{grad } \varphi = -\left(\vec{i} \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right), \quad (6)$$

$$|E| = \left[\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 \right]^{0,5}. \quad (7)$$

Результати моделювання характеристик електричного поля.

Під час аналізу розподілу характеристик електричного поля розмір розрядної камери набагато (на три порядки) перевищував розмір зернини. Нульові граничні умови за електричним потенціалом задані на зовнішній граничній області, розташованій настільки далеко від стінок камери, що останні не впливають на розподіл напруженості електричного поля в ній. З метою більш ґрунтовного аналізу умов формування коронних розрядів в об'ємі зернової маси виконано ряд розрахунків розподілу характеристик електричного поля для різних відносних положень зернин. Обчислення виконано у відносних одиницях для різних типових випадків відносного розташування зернин. Отримані дані в перерахунку на одиничну напругу між електродами ($U = 1$ В) наведено на рис. 4. Вони свідчать про значне підсилення напруженості електричного поля в зонах, які характеризуються великою крутизною їх поверхонь та малою відстанню між зернинами (рис. 4, а – рис. 4, в).

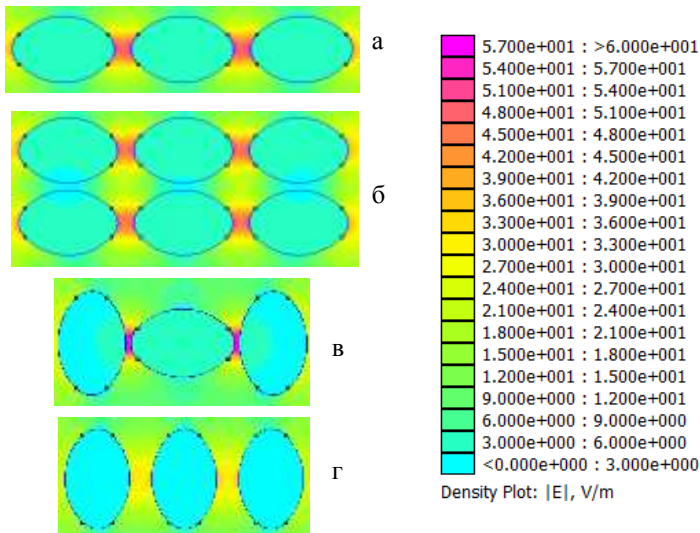


Рис. 4 – Результати розрахунку розподілу напруженості електричного поля в міжзернинному просторі для різних положень зернин.

Так, в області великої крутизни форми зернин значення напруженості електричного поля в 3-5 разів перевищують фонові значення. Разом з тим, в зонах близького розташування бокових поверхонь меншої крутизни підсилення напруженості електричного поля характеризується меншими значеннями на 40-50 відсотків, проте розміри областей підвищених значень напруженості електричного поля в цих випадках є значно більшими (рис. 4, г), що також сприяє розвитку коронних розрядів в гетерогенному середовищі.

При розрахунку розподілу напруженості електричного поля в об'ємі гетерогенного середовища слід звернути увагу на те, що в деяких режимах обробки зернової маси вологість в об'ємі кожної зернини може бути розподілена нерівномірно. Так, при зволоженні сухого зерна в його поверхневому шарі вологість збільшується, а в середині залишається на деякий час меншою, і навпаки, під час сушіння зерна вологість є зменшеною на зовнішньому шарі та збільшується в напрямі до центру. Для моделювання в такому випадку зернину поділено на три умовні шари з вологістю 14, 16 та 18 % (рис. 3). З рис. 3 видно, що розподіл вологості в зернині майже не впливає на характеристики поля в міжзернинному проміжку.

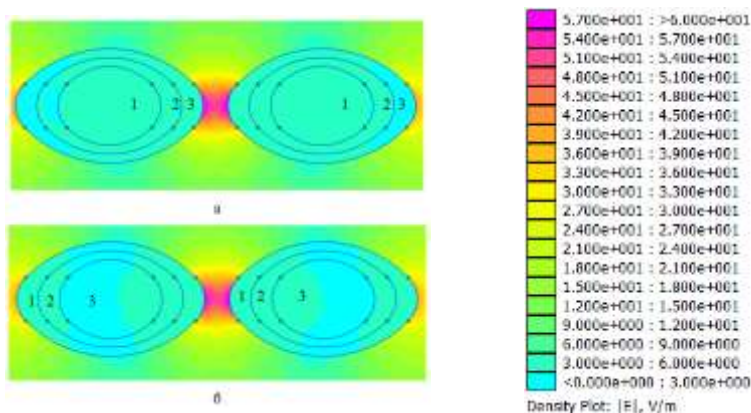


Рис. 5 – Результати розрахунку розподілу напруженості електричного поля в міжзернинному проміжку: а – для процесу зволоження, б – для процесу сушіння зерна: 1 – зона з вологістю 14 %, $\epsilon_1 = 7,8$; 2 – зона з вологістю 16 %, $\epsilon_1 = 8,2$; 3 – зона з вологістю 18 %, $\epsilon_1 = 8,7$.

Будова зерен деяких злакових культур і, зокрема, пшениці характеризується наявністю борідки [12], яка з фізичної точки зору є сукупністю мікровиступів на поверхні твердої фази матеріалу (рис. 6).



Рис. 6 – Борідка на поверхні зернини (збільшено в 400 разів).

визначення умов формування коронного розряду.

Моделювання розподілу характеристик електричного поля показало, що наявність борідки зумовлює значне (на 40-50 відсотків) підвищення напруженості електричного поля (рис. 7, а) порівняно з випадком, коли таке підсилення поля не враховується (рис. 7, б). Тому цей ефект також потребує залучення до аналізу під час

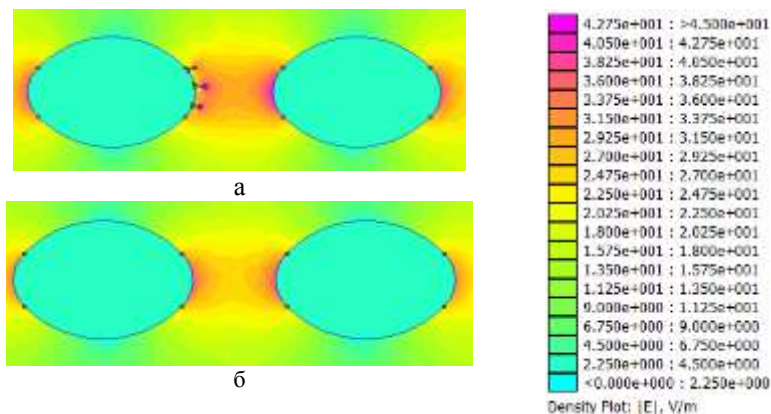


Рис. 7 – Розподіл напруженості в міжзернинному проміжку для зерна з вологістю 14 %, $\epsilon_1 = 7,8$: а – для зерен без борідки; б – для зерен з борідкою.

Висновки. Таким чином, в роботі обґрунтовано обчислення діелектричної проникності твердої фази гранульованого гетерогенного середовища за даними експериментальних вимірювань діелектричної проникності його насипної маси. З використанням чисельної моделі визначено просторовий розподіл характеристик електричного поля, результати розподілу електричного потенціалу, напруженості електричного поля в об'ємі зернової маси для різних значень її вологості і температури. Особливу увагу приділено аналізу впливу розташування зернин в зерновій масі на максимальні значення напруженості електричного поля.

За результатами аналізу виконаних обчислень зроблено висновок

про доцільність застосування отриманих даних для чисельного моделювання умов генерації коронних розрядів в гетерогенних середовищах на частотах до 1 МГц.

Список літератури. 1. Дубовенко К.В. Знезараження зернової продукції імпульсним коронним розрядом / К.В. Дубовенко, Д.О. Захаров // Вісник національного технічного університету "ХПІ" № 61 (967). – Харків : НТУ "ХПІ", 2012. – С. 139-149. 2. Захаров Д.О. Аналіз ефективності обробки зернової продукції імпульсним коронним розрядом / Д.О. Захаров, К.В. Дубовенко // Матеріали 8-ої Міжнар. науково-практ. конф. молодих учених, аспірантів і студентів. – Миколаїв: МДАУ, 2012. – С. 28-30. 3. Lawrence K.C. Measuring dielectric properties of hard red winter wheat from 1 to 350 MHz with a flow-through coaxial sample holder / K.C. Lawrence, S.O. Nelson, P.G. Bartley // Transactions of American Society of Agricultural Engineers, 1998. – PP. 143-150. 4. Kenyon W.E. Texture Effects on Megahertz Dielectric Properties of Calcite Rock Samples // Journal of Applied Physics. – 1984, Vol. 55, No 11. – PP. 3153-3159. 5. Берека О.М. Дослідження питомої електропровідності насінневої маси в електричних полях високої напруги // Праці Таврійського державного аграрного університету. – 2008, Т. 7, Вип. 8. – С. 213-217. 6. Ландау Л.Д. Электродинамика сплошных сред / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Наука, 1982. – 621 с. 7. Doyle W.T. The Influence of Particle Shape on Dielectric Enhancement in Metal-Insulator Composites / W.T. Doyle, I.S. Jacobs // Journal of Applied Physics, 1992, Vol. 71. – PP. 3926-3936. 8. Sihvola A.H. Effective Permittivity of Dielectric Mixtures / A.H. Sihvola, J.A. Kong // IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing. – 1988, Vol. 26, No 3. – PP. 420-429. 9. Jones S.B. Particle shape effects on effective permittivity / S.B. Jones, S.P. Friedman // Water Resources Research. – 2000, Vol. 36, No. 10. – PP. 2821-2833. 10. Tsang J. Theory of Microwave Remote Sensing / J. Tsang, J.A. Kong, R.T. Shin. – NY: John Wiley, 1985. – 476 p. 11. Chang C.S. Measuring Density and Porosity of Grain Kernels Using a Gas Pycnometer // American Association of Cereal Chemists, Vol. 65. No. 1. 1988. – P. 13-15. 12. Танайлова Е.А. Анатомо-морфологическая характеристика зерновок яровой пшеницы сортов triticum durum. – Дис...к-та биологических наук. 03.00.05. – Саратов: Саратовский гос. ун-т., 2009. – 180 с.

Надійшла до редколегії 13.11.2013

УДК 621.314

Моделювання характеристик електричного поля в гетерогенному середовищі тверда фаза-газ за експериментально визначеною діелектричною проникністю / Дубовенко К.В., Захаров Д.О. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2013. – № 65 (1038). – С. 118-128. Бібліогр.: 12 назв.

Обоснован расчет диэлектрической проницаемости твердой фазы гранулированной гетерогенной среды по данным экспериментальных измерений

диэлектрической проницаемости ее насыпной массы. На основании выполненного анализа рассчитаны характеристики электрического поля в объеме гетерогенной среды, необходимые для определения условий стойкой генерации коронного разряда.

Ключевые слова: моделирование, электрическое поле, гетерогенная среда.

Calculation of the electric permittivity for the solid phase of the granulated heterogeneous medium is grounded by the data of experimental measurements of its bulk mass electric permittivity. On the base of the analysis the electric field characteristics, necessary for determination of the conditions for stable corona discharge generation, are calculated.

Keywords: simulation, electric field, heterogeneous medium.



Дубовенко Костянтин Вікторович, доктор технічних наук, доцент. Отримав диплом інженера в Миколаївському кораблебудівному інституті за фахом "Електроустаткування суден" в 1981 р. Захистив дисертацію кандидата технічних наук за фахом "Теоретична електротехніка" в 1988 р. і дисертацію доктора технічних наук за фахом "Електротехнічні комплекси та системи" в 2007 р. в Інституті електродинаміки НАН України. Завідувач кафедри електротехнологій і електропостачання Миколаївського національного аграрного університету з 2008 р. Наукові інтереси пов'язані з проблемами фізичних полів електричних розрядів в суцільних середовищах, розробкою електротехнічних комплексів і систем електророзрядної дії.



Захаров Дмитро Олександрович, в 2013 році закінчив магістратуру в Миколаївському національному аграрному університеті за спеціальністю "Енергетика сільськогосподарського виробництва" та здобув кваліфікацію інженера-дослідника. Працював на посадах старшого лаборанта та завідувача лабораторіями кафедри електротехнологій і електропостачання Миколаївського національного аграрного університету. Асистент цієї ж кафедри з 2013 р. Наукові інтереси пов'язані з дослідженням впливу імпульсних та височастотних електромагнітних полів на біологічні середовища, розробкою електротехнічних комплексів і систем електророзрядної дії.

ВИМОГИ
до оформлення статей у Віснику Національного
технічного університету "ХПІ",
серія "**Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів.**
Теорія і практика"

Направлення (рубрики) тематичного випуску:

- електричні апарати;
- електричні машини;
- теоретичні основи електротехніки;
- сильні електричні та магнітні поля;
- електричні станції і мережі;
- комп'ютерне моделювання;
- використання електротехнологій;
- пристрої та методи неруйнівного контролю;
- електричний транспорт;
- інформація, гіпотези, думки.

Оформлення основних елементів статті – за зразком нижче. Оригінал статті готується в редакторі **Microsoft Word** (2000-2003) на українській / російській мові. Формат листа – А5. Поля: низ – 25 мм, інші – по 20 мм. Між елементами статті інтервал в один порожній рядок 10 pt.

Стаття відправляється в редакцію в друкарському варіанті (1 прим.) та в електронному варіанті по E-mail або на диску (без копонтитулів і нумерації сторінок). Друкарський варіант надається на листах білого паперу формату А4 щільністю 80-90 г/м², надрукованих на лазерному принтері з роздільною здатністю не менше 300 dpi, на одній стороні листа.

До статті додаються (по 1 прим.):

1 СУПРОВІДНИЙ ЛИСТ, де вказується направлення (рубрика), за яким рекомендується публікація статті, й перелік документів наведених нижче.

2 АКТ ЕКСПЕРТИЗИ (для громадян України) або офіційний лист з проханням опублікувати статтю (для громадян зарубіжних країн).

3 ДАНІ ПРО АВТОРІВ на мові статті (прізвище, ім'я, по батькові повністю, організація, посада, поштова адреса, телефон, E-mail).

4 КОПІЯ ДОКУМЕНТА ПРО ОПЛАТУ за публікацію.

Друкарські матеріали статті відправляють за адресою:
**Кафедра "Електричні апарати", НТУ "ХПІ", вул. Фрунзе, 21,
м. Харків, 61002, Україна.**

Оплата публікації **12,5 грн.** – за одну сторінку А5.

**Р/р 26008000074734 (UAH) в ПАТ "Укрсоцбанк", МФО
300023, код ЄРДПОУ 26450114, НТУ "ХПІ", ГО "Асоціація випус-
кників НТУ "ХПІ" (з позначкою: "SIEMA").**

Електронний варіант відправляють за адресою:

varshamova_i@rambler.ru

Також статтю можна завантажити за адресою
http://journals.uran.ua попередньо зареєструвавшись.

Довідки за телефонами:

секретар Варшамова Ірина Сергіївна, **mob. 0974604277.**

секретар Себякіна Наталія Валентинівна, **mob. 0667353882.**

УДК ... (10 pt)

В.Ф. БОЛЮХ, д.т.н., проф., НТУ "ХПІ", Харків

С.В. ОЛЕКСЕНКО, аспірант, НТУ "ХПІ", Харків

НАЗВА

(10 pt, жирний, вирівнювання по лівому краю з відступом 0,75 см.,
заголовні букви, без перенесень і скорочень)

Текст анотації (9 pt) на українській мові, до 5 рядків. Ключові слова.

Текст анотації (9 pt) на російській мові, до 5 рядків. Ключові слова.

Текст анотації (9 pt) на англійській мові, до 5 рядків. Ключові слова.

Вступ. У журналі публікуються результати досліджень і огляди в області електричних машин і апаратів, сильних електричних і магнітних полів, теоретичної електротехніки, електричного транспорту, світлотехніки, що не публікувалися раніше.

Мета, завдання дослідження.

Назва розділу і результати розв'язання завдання. Зміст структурується згідно вимогам постанови Президії ВАК України № 7-05/1 від 15.01.2003 р. Стаття складається з розділів, назви яких відображають актуальність і стан проблеми, методи дослідження, результати теоретичних і/або експериментальних досліджень, аналіз результатів, перспективи використання.

Висновки.

Список літератури: література, електронні ресурси.

В кінці статті приводиться фото кожного автора з короткою інформацією (9 pt).

Текст оформляється шрифтом **Times New Roman** 10 pt з одиночним міжрядковим інтервалом. Абзацні відступи – 0,75 см. Назва розділу оформлюється жирними буквами.

Математичні формули створюються у вигляді окремих об'єктів в редакторі формул **Microsoft Equation**. Розміри (pt): звичайний – 10, крупний індекс – 8, дрібний індекс – 6, крупний символ – 16, дрібний символ – 10. Стиль: текст, змінна – курсив; матриця, вектор – напівжирний курсив; інші – нормальний без нахилу. Формули розташовуються по центру і нумеруються в межах статті, номер – праворуч:

$$N = \tau_{u\max} / T_{mi} , \quad (1)$$

де $N = \dots; \tau_{u\max} = \dots; T_{mi} = \dots$.

Однакові символи в тексті і формулах повинні співпадати.

Ілюстрації (рисунок, фото, діаграми) і таблиці (9 pt) оформлюються за зразком без назв, всі пояснення – в тексті. Рисунок оформлюється в редакторі **Microsoft Word** як окремі об'єкти в тексті. Рисунок та таблиці відокремлюються від тексту інтервалом в один порожній рядок 10 pt.

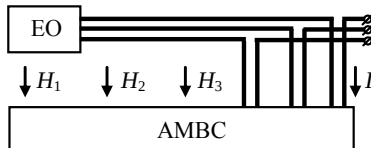


Рис. 1 – Структурна схема вимірювань поля.

Таблиця 1 – Вимоги щодо оформлення таблиці

Поле ліворуч	20 мм
Поле праворуч	20 мм
Поле зверху	20 мм
Поле знизу	25 мм

Список літератури оформляється за зразком, згідно стандарту ДСТУ 7.1-2006.

Посилання на математичні формули, ілюстрації, таблиці, джерела інформації даються за зразком: (1), (2)-(4); рис. 3, рис. 4,а; табл. 2; [5], [2-5].

Список літератури: 1. Сосков А.Г., Соскова И.А. Полупроводниковые аппараты: коммутация, управление, защита. – К: Каравелла, 2005 – 344 с. 2. Юферов В.Б., Егоров А.М., Шарый С.В. и др. Магнитоплазменная регенерация ОЯТ //

Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Зб. наук. праць. Тематичний вип.: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2008. – № 40. – С. 66-83. 3. Пат. 31677, Україна, МПК G01R 33/00. Пристрій для компенсації змінного магнітного моменту струмів / *О.Г. Король, В.С. Лушков, О.Г. Серета* та ін. – № u200708718. Заявлено 30.06.2007. Опубл. 25.04.2008, Бюл. № 8. – 3 с. 4. Бібліотека і доступність інформації у сучасному світі: електронні ресурси в науці, культурі і освіті / *Л.П. Костенко, А.О. Чекартьов, А.Г. Бровкін, І.А. Павлуша* // Бібліотечний вісник. – 2003. – № 4. – С. 43. – Режим доступу до журналу: <http://www.nbugov.ua/articles/2003/03klinko.htm>.

Фото авторів (2,5×3 см). Для кожного автора: прізвище, ім'я, по батькові; вчений ступінь; дати захисту дипломів і дисертацій, місце захисту; місце роботи, посада; короткий опис напрямів наукової діяльності – за зразком, інші відомості – на розсуд автора.



Болюх Владимир Федорович, профессор, доктор технических наук. Защитил диплом инженера по специальности "Криогенная техника" в 1979 г., диссертации кандидата и доктора технических наук в Харьковском политехническом институте по специальности электрические машины и аппараты, соответственно в 1987 и 2003 гг. Профессор кафедры "Общая электротехника" Национального технического университета "Харьковский политехнический институт" с 2004 г. Научные интересы связаны с проблемами линейных электромеханических преобразователей импульсного действия, криогенных и сверхпроводящих электромеханических устройств.

Надійшла до редколегії 24.03.2012

УДК 621.313:536.2.24:539.2

Синтез параметров индукционно-динамического двигателя / В.Ф. Болюх, С.В. Олексенко // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2013. – № 15 (988). – С. 93-104. Бібліогр.: 8 назв.

ЗМІСТ

ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ

БАЙДА Е.И.

Математическая модель индуктивного ограничителя аварийных
сверхтоков трансформаторного типа 3

ГРЕЧКО А.М.

Технологии быстрого прототипирования – от детской игрушки
до мирового господства 14

СЕРЕДА А.Г., ВАРШАМОВА И.С., ЛИТВИНЕНКО В.В.

Повышение уровня пожарной безопасности корабельных систем
электропитания 37

ЧЕПЕЛЮК А.А.

Анализ функциональных особенностей реле напряжения
с фиксированными параметрами срабатывания и автоматическим
повторным включением для защиты бытовых однофазных
потребителей от недопустимых отклонений напряжения
в питающей сети 53

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ

БОЛЮХ В.Ф., ОЛЕКСЕНКО С.В., ЩУКИН И.С.

Влияния формы и расположения якоря на эффективность
индукционно-динамического двигателя с использованием 3D
модели 63

КОЛЬВАХ Д.В., ПЕТРЕНКО А.Н., ПЕТРЕНКО Н.Я.

Исследование теплового состояния асинхронного
частотно-управляемого двигателя при перемежающемся режиме
работы S₆ 84

ПАНТЕЛЯТ М.Г., СЕДОВА Е.А.

Анализ электромагнитных процессов в роторе быстроходного
асинхронного генератора методом конечных элементов 92

ШЕВЧЕНКО В.В., КОШЕВОЙ О.П.

Конструктивные особенности турбогенераторов с воздушным
охлаждением 99

ШЕВЧЕНКО В.В., КУЛИШ Я.Р.

Анализ возможности использования разных типов генераторов для ветроэнергетических установок с учетом диапазона мощности.....	107
--	-----

СИЛЬНІ ЕЛЕКТРИЧНІ ТА МАГНІТНІ ПОЛЯ

ДУБОВЕНКО К.В., ЗАХАРОВ Д.О.

Моделювання характеристик електричного поля в гетерогенному середовищі тверда фаза – газ за експериментально визначеною діелектричною проникністю	118
Вимоги до оформлення статей	129

Наукове видання

**ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
"ХПІ"**

Збірник наукових праць

Серія

**Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів.
Теорія і практика**

№ 65 (1038) 2013

Відповідальний редактор д.т.н., проф. *Б.В. Клименко*

Технічний редактор: *Н.В. Себякіна*

Відповідальний за випуск к.т.н. *І.Б. Обухова*

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ:

61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21. НТУ "ХПІ"

Кафедра "Електричні апарати". Тел. (057) 707-69-76

E-mail: varshamova_i@rambler.ru

Обл.-вид. № 51-13

Підп. до друку 23.12.2013 р. Формат 60×84 1/16. Папір офісний. Riso-друк.

Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 7. Наклад 300 прим., 1-й з-д 1-80.

Зам. № 100. Ціна договірна.

Видавець і виконавець
Видавничий центр НТУ "ХПІ",
вул. Фрунзе, 21, м. Харків-2, 61002

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3657 від 24.12.2009 р.