Электротехника

УДК 62-83:622

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ АППАРАТАМИ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА

А.М. Абакумов, И.П. Степашкин

Самарский государственный технический университет Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Аннотация. Приведены результаты исследования разработанной адаптивной системы автоматического управления аппаратом воздушного охлаждения природного газа. Выполнен сравнительный анализ адаптивной системы с эталонной моделью объекта управления и двухконтурной системы автоматического управления. Проведен анализ возможности упрощения эталонной модели за счет отказа от учета инерционности электропривода и датчика обратной связи. Исследованы динамические характеристики систем с полной и упрощенной моделью. По результатам компьютерного эксперимента проведена оценка робастных свойств адаптивной системы управления с полной и упрощенной моделью. Рассчитаны кривые переходных процессов адаптивной системы с полной и упрощенной моделью при вариациях параметров объекта управления. Дана оценка запаса устойчивости систем при вариации параметров объекта управления.

Ключевые слова: annapam воздушного охлаждения природного газа, adanmuвная система автоматического управления, оценка робастных свойств, динамические характеристики системы, adanmuвная система с эталонной моделью, запас устойчивости системы, вариации параметров объекта управления.

В современных условиях при модернизации и проектировании установок охлаждения (УОГ) природного газа компрессорных станций магистральных газопроводов получают все большее применение системы автоматического управления (САУ) температурой газа на базе частотно-регулируемого привода (ЧРП) вентиляторов аппаратов воздушного охлаждения (АВО). По сложившейся терминологии такие системы называют САУ АВО газа [1]–[8]. Переход от дискретного способа регулирования частоты вращения вентиляторов к непрерывному, с использованием ЧРП, позволяет существенно уменьшить затраты электроэнергии на нужды охлаждения, а также благодаря использованию замкнутых САУ обеспечивает повышение точности и надежности поддержания требуемых температурных режимов работы УОГ [9–12].

Характерной особенностью обобщенного объекта управления (ОУ), вклю-

Абакумов Александр Михайлович (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Электромеханика и автомобильное электрооборудование»

Степашкин Иван Павлович, аспирант кафедры «Электромеханика и автомобильное электрооборудование».

чающего аэродинамические процессы и процессы теплообмена, рассматриваемых САУ является достаточно широкий диапазон вариаций параметров ОУ. В частности, коэффициент передачи ОУ может изменяться в 8...10 раз [13–14]. Эти вариации связаны прежде всего с изменением температуры наружного воздуха в течение суток и в зависимости от времени года, а также с изменением производительности компрессорной станции. В связи с достаточно медленным изменением характеристик ОУ по сравнению со временем переходных процессов в замкнутой системе при исследовании динамики САУ параметры объекта можно считать «замороженными».

При синтезе подобных систем предполагается, что информация об объекте и внешней среде не известна точно, а лишь задана с некоторой достоверностью. Достоверность при этом задается интервалами принадлежности (классами неопределенности) [15].

По результатам экспериментальных исследований математическая модель обобщенного ОУ [16] может быть задана в виде класса динамических объектов, описываемых дифференциальным уравнением первого порядка, а передаточная функция (ПФ) объекта может быть представлена в виде апериодического звена первого порядка:

$$W_O(p) = \frac{\Delta \theta(p)}{\Delta f(p)} = -\frac{k_O}{(T_O p + 1)'}$$
(1)

$$k_0 \in [k_{omin}, k_{omax}]; T_0 \in [T_{omin}, T_{omax}],$$

где θ, *f* – температура газа на выходе ABO и частота вращения вентиляторов; *k*_{omin}, *k*_{omax}; *T*_{omin}, *T*_{omax} – нижние и верхние границы коэффициента передачи и постоянной времени OУ.

Требуемое качество управления рассматриваемым ОУ может быть обеспечено использованием двухконтурной системы [5], а также адаптивной системы с эталонной моделью [17].

В [7] показано, что для исключения перерегулирования частоты вращения вентиляторов, ведущего к неблагоприятным динамическим нагрузкам в кинематической части привода, в цепь обратной связи САУ целесообразно включить ПД-регулятор с ПФ:

$$W_{R3} = (T_{R3}p + 1), T_{R3} = T_{O.N},$$
⁽²⁾

где $T_{O,N}$ – постоянная времени объекта с номинальными параметрами (номинального объекта) с ПФ:

$$W_{0.N}(p) = -\frac{k_{0.N}}{(T_{0.N}p+1)}.$$
(3)

С учетом указанного структурная схема системы с эталонной моделью может быть представлена в виде рис. 1.

Динамические свойства отдельных элементов для приращения переменных отражены соответствующими ПФ: $W_E(p)$ – электропривода; $W_O(p)$ – обобщенного объекта управления; $W_S(p)$ – датчика температуры на выходе ABO; $W_M(p)$ – эталонной модели; $W_{R1}(p)$, $W_{R2}(p)$, $W_{R3}(p)$ – регуляторов (на структурной схеме и далее по тексту оператор p для упрощения записи опущен).

Задающий сигнал на входе системы – x; выходная регулируемая координата – температура газа θ на выходе ABO; частота вращения вентиляторов – f.



Рис. 1. Структурная схема системы с эталонной моделью

ПФ эталонной модели с учетом соотношений (2), (3) принята в виде

$$W_M = k_{O,N} W_E W_S. \tag{4}$$

Для сравнения динамических характеристик адаптивной системы с моделью и двухконтурной системы, рассмотренной в [5], схема на рис. 1 преобразована к виду, представленному на рис. 2.



Рис. 2. Преобразованная структурная схема системы

ПФ внутреннего замкнутого контура имеет вид

$$W_{\theta X_1} = \frac{\theta(p)}{X_1(p)} = \frac{W_E W_O}{1 + W_{R1} W_{R3} W_E W_O W_S}.$$
(5)

Обозначим знаменатель ПФ (5):

$$1 + W_{R1}W_{R3}W_EW_OW_S = A(p).$$

ПФ участка с положительной обратной связью:

$$W_{X_1X_2} = \frac{X_1(p)}{X_2(p)} = 1 + W_M W_{R1}.$$
 (6)

ПФ модели в общем виде:

$$W_M = W_{O,N} W_E W_S W_{R3}.$$
(7)

С учетом этого

$$W_{X_1X_2} = 1 + W_E W_{O.N} W_S W_{R3} W_{R1}.$$
(8)

Введем обозначение:

$$1 + W_E W_{O,N} W_S W_{R3} W_{R1} = A_1(p).$$

В номинальном режиме $A_1(p) = A(p)$ и ПФ прямой цепи имеет вид

$$W_{\theta X} = W_{R2} W_{X_1 X_2} W_{\theta X_1} = W_{R2} A_1(p) \frac{W_E W_O}{A(p)} = W_{R2} W_E W_O.$$
(9)

Как следует из приведенного выражения, при номинальном режиме наличие контура адаптации не влияет на работу САУ. При изменении значения коэффициента передачи и постоянной времени процесса теплообмена на выходе регулятора с ПФ W_{R1} (см. рис. 1) формируется сигнал, компенсирующий влияние этих изменений на динамику системы.

Из анализа представленных структур следует, что динамические характеристики двухконтурной САУ и системы с моделью будут эквивалентны, если обеспечено совпадение динамических характеристик звеньев внутренних замкнутых контуров обеих систем и во внешнем контуре двухконтурной системы ПФ эквивалентного регулятора выбрана в виде

$$W_{R0} = W_{R2}(1 + W_{R1}W_M). (10)$$

Рекомендации по выбору рациональной структуры САУ зависят от особенностей конкретной системы. В частности, в рассматриваемом случае с позиций простоты реализации и настройки регуляторов предпочтительной является структура адаптивной системы с эталонной моделью.

Представляет интерес анализ возможности упрощения эталонной модели за счет отказа от учета инерционности электропривода и датчика обратной связи, т. е. приведения ПФ эталонной модели (3) к виду

$$W_{M}' = k_{O,N} k_E k_S.$$
 (11)

Оценка потери качества управления при переходе к упрощенной эталонной модели проведена на основе моделирования динамических характеристик системы.

Количественные характеристики параметров рассматриваемой системы для конкретных условий работы УОГ получены в результате экспериментальных исследований [16, 17].

Значение постоянной времени T_E зависит от настроек частотнорегулируемого привода и составляет 5...10 с. Постоянная времени датчика T_S зависит от применяемого датчика и его настроек и составляет, как правило, 15...30 с.

При компьютерном моделировании САУ использовалась система относительных единиц. В относительных единицах принято значение $k_0 k_E k_S = 1$. В качестве расчетного (эталонного) значения постоянной времени номинального ОУ принято $T_{QN} = 120$ с. Это значение использовано в качестве базового для расчетов относительных значений постоянных времени других звеньев САУ. Постоянная времени ОУ в относительных единицах равна $T_0^* = 1$ о.е., датчика $T_{S}^{*} = 0,1$ о. е., электропривода $T_{E}^{*} = 0,05$ о. е., $T_{R3}^{*} = T_{O}^{*} = 1$ о. е. В качестве регулятора с ПФ W_{R1} принят пропорциональный регулятор с ко-

эффициентом передачи $k_{R1} = 5$.

Во внешнем контуре системы использован интегральный регулятор с ПФ:

$$W_{R2} = \frac{1}{T_{R2}p}.$$
 (12)

Его постоянная времени по результатам компьютерного эксперимента принята $T_{R2}^* = 0,6T_0^* = 0,6$ о.е.

ПФ полной модели по выражению (4) имеет вид

$$W_M = \frac{1}{0,005p^2 + 0,15p + 1}.$$
(13)

Исследованы динамические характеристики САУ с полной эталонной моделью (4) и упрощенной моделью (11). На рис. 3 приведены графики переходного процесса изменения температуры газа на выходе ОУ ($\Delta \theta$) при отрицательном единичном ступенчатом изменении сигнала задания: кривая 1 – для системы с полной эталонной моделью W_M , при этом время t_p регулирования составляет 3,61 о.е.; кривая 2 – для системы с упрощенной моделью W_M' , в этом случае время регулирования – 3,74 о.е. Перерегулирование в обоих случаях равно нулю.



Рис. 3. Переходный процесс изменения температуры газа на выходе АВО при отработке задающего воздействия

На рис. 4 приведены графики переходного процесса изменения частоты вращения двигателей вентиляторов (Δf) при отрицательном единичном ступенчатом изменении сигнала задания температуры: кривая 1 – для системы с полной эталонной моделью W_M , при этом время t_p регулирования составляет 1,31 о.е; кривая 2 – для системы с упрощенной моделью W_M' , в этом случае время регулирования – 1,64 о.е.; при этом перерегулирование в обоих случаях равно нулю.



Рис. 4. Переходный процесс изменения частоты вращения электродвигателей вентиляторов при отработке задающего воздействия по температуре

Для оценки адаптивных свойств системы с упрощенной моделью W_M' на рис. 5 приведены графики переходного процесса изменения частоты вращения двигателей вентиляторов (Δf) при отрицательном единичном ступенчатом изменении сигнала задания: кривая 1 – для $k_0 = k_{0.N.}$, при этом время t_p регулирования составляет 1,64 о.е; кривая 2 – для $k_0 = 10k_{0.N.}$, в этом случае время регулирования – 1,41 о.е. Перерегулирование в обоих случаях равно нулю.

Анализ приведенных кривых показывает, что использование в адаптивной системе упрощенной эталонной модели W_M' несущественно влияет на показатели качества переходных процессов по сравнению с использованием полной модели W_M и система с упрощенной моделью сохраняет адаптивные свойства.

Для оценки качества динамических характеристик систем широко используется понятие грубости (робастности) относительно некоторого свойства, присущего модели САУ. Это свойство называется грубым, если оно сохраняется при вариациях параметров модели САУ. В [15] предложено характеризовать грубость обеспечением запаса устойчивости при вариациях параметров звеньев САУ, в частности параметров ОУ.



Рис. 5. Переходный процесс изменения частоты вращения электродвигателей вентиляторов при вариациях коэффициента передачи ОУ



Рис. 6. ЛАХ и ЛФХ разомкнутой системы при изменении коэффициента передачи объекта управления в 10 раз:

L1(ω), φ1(ω) – ЛАХ и ЛФХ номинальной системы; L2(ω), φ2 (ω) – ЛАХ и ЛФХ системы при возрастании коэффициента передачи объекта в 10 раз; LO(ω), φO (ω) – ЛАХ и ЛФХ варьированного объекта управления

Для рассматриваемой адаптивной системы на рис. 6 представлены логарифмические амплитудная (ЛАХ) и фазовая (ЛФХ) характеристики разомкнутой системы при изменении коэффициента передачи объекта управления в 10 раз.

Как следует из анализа приведенных характеристик, запас по фазе номинальной и варьированной системы $\Delta \varphi_1 \approx \Delta \varphi_2 \approx 90^{\circ}$. Запас по амплитуде номинальной и варьированной системы $\Delta L_1 \approx \Delta L_2 \approx 23$ дБ. Полученные результаты свидетельствуют о грубости системы по принятому показателю.

Выводы

Разработанная адаптивная CAУ с эталонной моделью аппаратами воздушного охлаждения газа обладает робастными свойствами и обеспечивает требуемые показатели качества регулирования в условиях широкого диапазона изменения параметров объекта управления. Использование в CAУ упрощенной эталонной модели вместо полной приводит к несущественным потерям качества управления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. *Кумар Б.К., Выгонюк П.И.* Система автоматического управления аппаратами воздушного охлаждения сырого природного газа // Вестник Казахского нац. техн. ун-та им. К.И. Сатнаева. 2011. № 1 (83). С. 67–71.
- 2. Лапаев Д.Н., Мочалин Д.С., Титов В.Г. Управление системой воздушного охлаждения газа компрессорных станций // Труды Нижегор. гос. техн. ун-та им. Р.Е. Алексеева. 2014. № 5 (107). С. 79–83.
- 3. Абакумов А.М., Алимов С.В., Мигачева Л.А. Аналитическое и экспериментальное исследование стационарных режимов работы установок охлаждения газа компрессорных станций магистральных газопроводов // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. 2010. № 7. С. 113–117.
- 4. Абакумов А.М., Алимов С.В., Мигачева Л.А., Мосин В.Н. Автоматическое управление температурой газа на выходе аппаратов воздушного охлаждения // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2011. – № 1. – С. 151–158.
- 5. Абакумов А.М., Алимов С.В., Мигачева Л.А., Мигачев А.В. Исследование системы автоматического управления температурой газа на выходе аппаратов воздушного охлаждения // Известия вузов. Электромеханика. – 2014.– № 5. – С. 68–71.
- Абакумов А.М., Мигачев А.В. Оценка энергетической эффективности использования системы автоматического управления температурой газа на компрессорных станциях // Сб. трудов Международной научно-практической конференции. Ашировские чтения. Т. II: Проблемы энергетического обеспечения нефтегазового комплекса. – Самара: СамГТУ, 2016. – С. 292– 295.
- 7. Абакумов А.М., Мигачев А.В., Степашкин И.П. Исследование системы управления аппаратом воздушного охлаждения природного газа // Известия вузов. Электромеханика. 2016. № 6. С. 130–134.
- Абакумов А.М., Мигачев А.В., Степашкин И.П. Энергосбережение в установках охлаждения природного газа // Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 60-летию высшего нефтегазового образования в Республике Татарстан. Т. II: Достижения, проблемы и перспективы развития отрасли. – Альметьевск: Альметьевский гос. нефт. ин-т, 2016. – С. 61–63.
- Абакумов А.М. и др. Оптимизация стационарных режимов работы установок охлаждения газа компрессорных станций магистральных газопроводов // Известия вузов. Электромеханика. – 2011. – № 3. – С. 110–113.
- 10. Шварц Г.Р., Абакумов А.М., Мигачева Л.А. Применение регулируемого электропривода в технологиях транспорта нефти и газа. Кн. 1. – М.: Машиностроение-1, 2008. – 240 с.
- Артюхов И.И., Аршакян И.И., Крылов И.П. Автоматическое управление аппаратами воздушного охлаждения на объектах магистрального транспорта газа // Мехатроника, автоматизация, управление. 2003. № 1. С. 33–36.
- 12. Артюхов И.И., Аршакян И.И., Тарисов Р.Ш., Тримбач А.А., Устинов Е.В. Ресурсосберегающая технология охлаждения газа на компрессорных станциях // Вестник Саратовского госу-

дарственного технического университета. – 2011. – № 1 (54), вып. 3. – С. 25–32.

- 13. Тарисов Р.Ш. Адаптивная система управления электроприводом вентиляторов установок охлаждения газа: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Р.Ш. Тарисов. Саратов, 2011. 24 с.
- 14. Артюхов И.И., Тарисов Р.Ш. Система управления частотно-регулируемым электроприводом вентиляторов установки охлаждения газа с применением нечеткой логики // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 5 (Электронный журнал). URL: http://www.science-education/ru/105-7149
- Методы классической и современной теории автоматического управления: Синтез регуляторов систем автоматического управления / под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 616 с.
- Мигачев А.В., Потемкин В.А., Степашкин И.П. Параметрическая идентификация аппарата воздушного охлаждения газа как объекта управления // Материалы VIII Всероссийской с международным участием научно-практической конференции «Актуальные исследования гуманитарных, естественных, общественных наук». – Новосибирск: ООО «ЦРСНИ», 2016. – С. 23–28.
- 17. Abakumov A.M., Stepashkin I.P. Research of the adaptive automatic control system at the natural gas air-cooling unit // IEEE Xplore, 2017. doi: 10.1109/ICIEAM.2017.8076297.
- 18. *Терехов В.М., Осипов О.И.* Системы управления электроприводов. М.: Академия, 2005. 304 с.

Статья поступила в редакцию 20 января 2018 г.

THE RESEARCH OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS OF NATURAL GAS AIR-COOLING UNITS

A.M. Abakumov, I.P. Stepashkin

Samara State Technical University 244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

Abstract. The paper presents the results of a study of the developed adaptive automatic control system for the natural gas air-cooling unit. A comparative analysis of the adaptive system with a reference model of the control object and a two-loop automatic control system is shown. The analysis of the possibility of simplifying the reference model by eliminating the inertia of the electric drive and the feedback sensor is examined. The dynamic characteristics of systems with a complete and simplified model are studied. Based on the results of the computer experiment, the robust properties of the adaptive control system were evaluated with a complete and simplified model. The curves of the transient processes of the adaptive system with a complete and simplified model are calculated with the variations in the parameters of the control object. The estimation of the stock of stability of systems at the variation of parameters of object of management is given.

Keywords: natural gas air cooling unit, adaptive automatic control system, robust properties estimation, dynamic system characteristics, adaptive system with reference model, system stability margin, control object parameter variations.

Alexander M. Abakumov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor. Ivan P. Stepashkin, Postgraduate Student.

УДК 621.318.3.004.4

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СОУДАРЕНИЯ ЯКОРЯ С ИНДУКТОРОМ В ИМПУЛЬСНОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ СЕЙСМОИСТОЧНИКЕ

А.С. Ануфриев¹, В.П. Певчев²

¹ Самарский государственный технический университет Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

² Тольяттинский государственный университет Россия, 445020, Самарская обл. г. Тольятти, ул. Белорусская, 14

Аннотация. Во многих устройствах при срабатывании возникают соударения массивных элементов. Соударение может быть как одним из основных этапов процесса срабатывания, определяющим передачу механической энергии в нагрузку, так и нежелательным фактором, тем не менее ограничивающим ресурсные параметры. Расчет возникающих при соударениях сил и механических напряжений весьма важен. В статье предложена компьютерная модель для расчета процесса соударения массивных элементов источника сейсмических сигналов. Модель представлена в виде схемы, включающей механическую и акустическую подсистемы. Она позволяет с помощью простых действий группировать в одном расчете процессы, протекающие в подсистемах различной физической природы. Модель позволяет выполнять многовариантные исследования устройств, у которых в процессе срабатывания большое значение имеют этапы передачи энергии посредством ударного взаимодействия массивных элементов, а также иных устройств, характеристики которых в той или иной мере определяются наличием взаимодействий ударного типа.

Ключевые слова: аналогии, акустическая схема, двухполюсный схемный элемент массы, дуальное преобразование, взаимодействие, компьютерная модель, короткоходовой электромагнитный двигатель, механическая схема, обобщенные координаты, параметры, удар, сейсмоисточник, сейсморазведка.

При разработке специальных электромеханических устройств, таких как мощные виброударные стенды, молоты, источники сейсмических колебаний и пр., одной из проблем является получение данных о механических силах, напряжениях и деформациях конструкции. Если устройства выпускаются малыми сериями при ограниченных времени и финансировании исследований, то эту информацию зачастую невозможно получить в ходе физических экспериментов. Получение аналитических выражений для расчета механических сил и напряжений, возникающих при соударениях имеющих сложную конструкцию элементов, без значительного объема экспериментальных данных возможно лишь с очень грубыми допущениями, снижающими достоверность результата. Для решения этой проблемы целесообразны численные расчеты частных случаев – вариантов конструкции и режима работы.

Существуют два основных подхода к численному расчету с использованием либо сеточной модели, либо схемы замещения. Сеточная модель может быть реализована с помощью универсальных программ, например таких, как Ansys [1],

Ануфриев Андрей Сергеевич, аспирант.

Певчев Владимир Павлович (д.т.н., доц.), профессор кафедры «Промышленная электроника».

Nastran [2]. Однако стандартное оснащение их подсистем, моделирующих механические напряжения, позволяет оперировать нагружающими конструкцию силами, но не скоростями движения. Программы типа FlowVision [3] позволяют задавать скорости, но ориентированы на анализ потоков в жидкостях и газах. Кроме того, из-за сложности этих универсальных программ и значительных затрат времени на моделирование динамических процессов их рационально использовать лишь при проверке достоверности результатов, получаемых иными способами. Для устройств, серийный выпуск которых не предполагается, оказываются нецелесообразными также разработки специальных программ, реализующих сеточные модели, если это не является задачей, например, диссертационного исследования.

Если допустить не снижающее достоверности результата уменьшение точности, то для первого приближения указанных расчетов могут быть рекомендованы более простые в разработке и использовании схемные модели [4]. При их применении доступны многовариантные исследования объекта с различными модификациями конструкций и режимов работы, позволяющие компенсировать снижение точности возможностью быстрого получения разнообразной информации о нем. Кроме того, схемные модели позволяют с помощью простых действий группировать в одном расчете процессы, протекающие в подсистемах различной физической природы: электрической, магнитной, акустической, механической [5, 6].

Объект исследования

В нефтегазовой сейсморазведке для создания сейсмических волн, распространяющихся в земной коре на глубину до 5–7 км, в настоящее время используются импульсные источники сейсмических воздействий (сейсмоисточники) «Енисей» [7] и «Геотон» [8], построенные на основе короткоходового электромагнитного двигателя [9]. Они создают импульсы силы воздействия на поверхность в несколько десятков тонн с длительностью в несколько миллисекунд и высокой идентичностью создаваемых сейсмических колебаний [20].



Рис. 1. Силовой модуль электромагнитного сейсмоисточника

На рис. 1 приведена схематично конструкция силового модуля такого сейсмоисточника. Он содержит индуктор 1 с обмоткой возбуждения 2 и якорь, консоли 4 которого опираются на стойки размещенного на поверхности грунта излучателя 5. Индуктор 1 с прикрепленным к нему и опирающимся на излучатель пригрузом 6 расположен с зазором δ между нижней плоскостью якоря и полюсами индуктора. Начальная величина зазора δ_0 составляет (4–5)·10⁻³ м.

При пропускании тока по обмотке 2 в магнитопроводах якоря и индуктора создается сила f притяжения якоря к индуктору. Через стойки и излучатель импульс механического воздействия перездается на грунт, а индуктор с пригрузом 4 подлетают вверх. Для рассматриваемых импульсных сейсмоисточников основным является режим работы со значительными паузами между воздействиями (2–6) с. Поэтому такие параметры, как масса пригруза 6 и величина механической энергии воздействия, подобраны таким образом, что после полного выбора зазора между якорем и индуктором происходит их соударение и далее якорь двигается вместе с индуктором. Они вместе подлетают на (2–5)·10⁻² м, после чего возвращаются в исходные положения под действием силы тяжести. При возврате пригруз соударяется с излучателем, а консоли якоря – со стойками излучателя. В ходе эксплуатации из-за многократных ударов в якоре накапливаются усталостные напряжения, приводящие к его ускоренному разрушению.

Для формирования импульса тока в обмотке 2 используется схема, приведенная на рис. 2 [10]. Обмотка (здесь Y) зашунтирована диодом VD и присоединена через тиристор VS к накопителю энергии – электрическому конденсатору C, заряженному до необходимого напряжения (зарядное устройство не показано). При открывании в момент времени t_0 тиристора VS конденсатор C за время t_0-t_P , составляющее $(1,5-2)\cdot 10^{-3}$ с, разряжается на обмотку Y. Протекание тока по виткам обмотки сопровождается появлением магнитного потока Φ , замыкающегося вокруг обмотки через зазор δ и по магнитопроводам индуктора и якоря, и созданием между ними силы f притяжения. Большая скорость изменения магнитного потока, соответствующая указанному значению t_P , усложняет конструкцию якоря и индуктора. Их магнитопроводы выполнены в виде пакетов листов электротехнической стали, которые заключены в сварные стальные каркасы [11, 12].



Рис. 2. Система питания электромагнитного двигателя сейсмоисточника: *а* – формирователь импульсов тока; *б* – диаграммы работы

Особенностью режима работы сейсмоисточника при использовании описанной схемы является то, что в момент t_{δ} полного выбора зазора между якорем и индуктором и далее ток в обмотке электромагнитного двигателя не равен нулю.

Из-за этого якорь не может отскочить от индуктора, то есть их соударение носит неупругий характер. В соответствии с теоремой потерянных скоростей Карно – Остроградского выделившаяся при соударении энергия Δ*A* [13]

$$\Delta A = \frac{1-K}{2(1+K)} [m_1(v_{11}-v_{12})+m_2(v_{21}-v_{22})],$$

где *К* – коэффициент восстановления: *К*=0 при абсолютно неупругом ударе и *K*=1 при абсолютно упругом ударе;

*m*₁, *m*₂ – массы соударяющихся тел;

*v*₁₁, *v*₂₁ – скорости движения масс до удара;

*v*₁₂, *v*₂₂ – скорости движения масс после удара, максимальна при *K*=0.

При частично-упругом соударении ΔA уменьшается с ростом *K*. Отметим, что из-за наличия тока в обмотке становится также больше сила соударения консолей якоря со стойками излучателя при возврате элементов сейсмоисточника в исходное положение.

При составлении схемы, моделирующей соударение якоря с индуктором, не будем учитывать силы веса элементов. В импульсных сейсмоисточниках эти силы в сотни раз меньше сил соударения. Не будем учитывать также пластические деформации в зоне контакта соударяющихся якоря и индуктора, так как в практике эксплуатации сейсмоисточников при скорости встречного движения до 2,5 м/с таких деформаций выявлено не было. Энергия соударения якоря с индуктором рассеивается в процессе затухания возникающих в их конструкции упругих колебаний – акустических. По данным эксперимента, их частота составляет (2–2,5)·10³ Гц, а амплитуда ускорений достигает 10³ м/с². Создается также сильный шум в воздухе, а накапливающиеся в силовом каркасе якоря усталостные напряжения приводят к его ускоренному разрушению.

Основа предлагаемой схемы, моделирующей соударение якоря с индуктором в момент t_{δ} , приведена на рис. 3. Здесь m_1 и m_2 – массы соударяющихся индуктора и якоря, представленных двухполюсниками, соединенными «неподвижными» полюсами с системой отсчета [17]; f – электромагнитная сила; AC – акустическая подсистема, моделирующая затухающие колебания в конструкции. В сейсмоисточниках «Енисей» и «Геотон» значения скоростей движения индуктора и якоря в момент t_{δ} составляют соответственно v_1 =1,2 м/с, v_2 =1 м/с. При необходимости расчета всего процесса срабатывания сейсмоисточника от момента t_0 эта схема дополняется схемами замещения электрической и магнитной подсистем [6] и последовательно с блоком AC ставится управляемый ключ.



Рис. 3. Схема замещения системы соударяющихся масс

При описанных допущениях акустическая подсистема может быть промоделирована полостью (рис. 4a), на заполняющую которую рабочую среду посредством поршня осуществляется воздействие f_a от механической подсистемы [5].



Рис. 4. Акустическая подсистема; *а* – модель; *б* – акустическая схема; *в* – электрическая схема замещения

Механической силе f_a воздействия на поршень в рабочей среде акустической подсистемы противодействует избыточное давление p_a . В схеме на рис. 46 источник давления p_a фиктивный, так как энергия поступает в акустическую подсистему из механической, поэтому при объединении схем замещения этих подсистем он исчезнет. Дополнительный элемент d полости моделирует упругие свойства рабочей среды – акустическую податливость ξ_a . Тепло, возникающее при ее сжатии, передается во внешнюю среду, и этот процесс моделируется акустическим сопротивлением χ_a . Рабочая среда перемещается на расстояние, намного меньшее условного диаметра зоны взаимодействия соударяющихся тел, поэтому ее инерционность и сопротивление перемещению учитывать не будем.

Определим величины параметров ξ_a и χ_a . Податливость ξ_a

$$\xi_a = \frac{h}{ES}$$

где E – модуль упругости соударяющихся тел;

h – максимальная величина деформаций;

S – площадь соприкосновения тел.

Если принять, что за четверть периода колебаний, возникающих в сталкивающихся телах, с частотой

$$\omega = \sqrt{1/\xi_a m^*}$$

где m^* – эквивалентная масса [14] тел m_1 и m_2 :

$$m^* = 1/(1/m_1 + 1/m_2),$$

вся их кинетическая энергия запасается в ξ_a , то

$$\frac{m^* v_0^2}{2} = \frac{h^2}{2\xi_a}$$

где v_0 – разность скоростей сталкивающихся тел. При этом величина податливости ξ_a может быть определена по формуле

$$\xi_a = \frac{m^* v_0^2}{S^2 E^2} \,.$$

Величина сопротивления χ_a определяет величину потерь энергии в процессе соударения тел и влияет на форму возникающих в них затухающих колебаний. В теории механики для описания потерь при частично-упругих соударениях используется введенное Ньютоном понятие коэффициента *К* восстановления – это отношение импульса разгрузки к импульсу нагрузки. В справочниках в основном приводятся значения коэффициента восстановления для случая соударения с идеальной неподвижной опорой тел шарообразной формы, выполненных из различных материалов [16].

Получение выражения для определения χ_a на основе коэффициента K – в целом весьма сложная задача. При незначительном искажении формы колебаний, то есть при K>0.9,

$$\chi_a = \frac{\omega m^*}{\pi} \left(1 - K^2 \right)$$

В остальной части диапазона (0<K<0,9) с допустимой потерей точности можно определить χ_a с помощью регрессивного анализа экспериментальных данных о возникающих в конструкции колебаниях. Например, для якоря сейсмоисточника «Енисей» сопротивление χ_a в функции экспоненты определено по формуле

$$\chi_a \approx 1.7 \cdot 10^{-5} \omega m^* e^{4(1-K)}.$$

Для возможности совмещения расчета процесса соударения якоря с индуктором с расчетом прочих составных частей процесса срабатывания электромагнитного сейсмоисточника заменим акустическую и механическую схемы электрическими. При этом появится возможность моделировать процесс срабатывания сейсмоисточника, используя одну-единственную схему, объединяющую все его подсистемы, без применения интервальной модели с алгоритмом переключения с одной подсхемы на другую и определением на каждое такое переключение новых начальных условий. Так как топологии электрической и акустической схем одинаковы [5], то акустической схеме по рис. 46 соответствует электрическая схема замещения рис. 4e, содержащая элементы: аналогичный источнику давления источник напряжения u_a и аналогичные податливости ξ_a емкость C_a , а сопротивлению χ_a сопротивление R_a .

Существуют две в целом равнозначные системы электромеханических аналогий [17]: «сила ↔ ток» и «сила ↔ напряжение». С использованием более популярной аналогии «сила ↔ напряжение» механическая схема рис. З превращается при дуальном перестроении в электрическую схему, приведенную на рис. 5, на которой индуктивностями моделируются массы элементов механической системы. Необходимость дуального перестроения обусловлена тем, что «сила» в схеме, приведенной на рис. 3, – это обобщенная координата потокового типа, а «напряжение» в получаемой электрической схеме – дифференциального [15].

Начальные для процесса соударения значения скоростей движения масс индуктора и якоря моделируются начальными значениями токов в индуктивностях L_1 и L_2 . К точкам *a* и *б* на рис. 5 присоединена электрическая схема замещения акустической подсистемы (см. рис. 4*в*). С программным обеспечением для численного расчета у полученной схемы может возникнуть конфликт, так как две индуктивности L_1 и L_2 составляют замкнутый контур. Для разрешения указанного конфликта в этот контур должен быть добавлен ничего не моделирующий резистор с нулевым сопротивлением [4].



Рис. 5. Электрическая схема замещения

При использовании аналогии «сила \leftrightarrow ток» топология электрической схемы замещения механической системы такая же, как у приведенной на рис. 3 схемы, но теперь уже акустическая схема должна подвергаться дуальному перестроению – замене емкости индуктивностью, сопротивления – проводимостью, последовательного их соединения – параллельным. Масса моделируется электрической емкостью, и начальные для процесса соударения значения скоростей движения масс индуктора и якоря моделируются начальными значениями напряжений на соответствующих конденсаторах. Конфликт с программным обеспечением для численного расчета в такой схеме разрешается включением параллельно любому из этих конденсаторов ничего не моделирующего резистора с сопротивлением $R \rightarrow \infty$. Схема механической системы этого вида может быть получена дуальным перестроением схемы, приведенной на рис. 5.

Предложенная модель актуальна прежде всего для устройств, в процессе срабатывания которых соударения массивных тел являются этапом передачи энергии в нагрузку [18, 19]. Особое внимание обращаем на моделирование работы сейсмоисточников типа «падающий груз» с передачей энергии от ударника плите-излучателю в процессе ударного взаимодействия. В [14] рассмотрены особенности работы такого сейсмоисточника и было сделано предложение, что если удару придать характер частично-упругого с более высоким коэффициентом восстановления, то возможен более эффективный режим передачи энергии от ударника излучателю, чем в известных сейсмоисточниках типа «падающий груз».

Заключение

Расчет механических сил и напряжений, возникающих при соударениях элементов, имеющих сложную конструкцию, возможен с применением электрических схем замещения. С применением метода аналогий и дуального преобразования были получены схемы, объединяющие акустическую и механическую подсистемы исследуемого устройства в единую электрическую схему замещения. Для определения значений параметров элементов акустической схемы – податливости и акустического сопротивления – предложены аналитические выражения и регрессивный анализ экспериментальных данных о возникающих в конструкции колебаниях. Достоверность результатов моделирования может быть проверена натурными экспериментами с помещением датчиков в доступные места конструкции. БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Руководство по основным методам проведения анализа в программе ANSYS. 399 с. [Электронный ресурс]. URL: http://old.bsau.ru/netcat_files/File/CIT/manuals/ANSYS.pdf (дата обращения 21.04.2018).
- Расчет и оптимизация конструкций [Электронный ресурс]. URL: http://www.mscsoftware.ru/products/msc-nastran (дата обращения 21.04.2018).
- Система моделирования движения жидкости и газа FlowVision. 53 с. [Электронный ресурс]. URL: http://old.bsau.ru/netcat_files/File/CIT/manuals/Flow_Vision.pdf (дата обращения 21.04.2018).
- 4. *Pevchev V.P.* The use of Micro-CAP software to simulate operating processes of electromechanical impulse devices / Russian Electrical Engineering. 2010. Vol. 81. № 4. P. 213–216.
- 5. *Кудинов А.К., Певчев В.П.* Схема замещения механоакустической системы сейсмоисточника с мультипликатором // Вестник Донского государственного технического университета.— 2011.— Т. 11. № 3(54).
- 6. *Кудинов А.К., Певчев В.П.* Составление схем замещения электромагнитных систем // Электротехника. – 2012. – № 3. – С. 32–36.
- 7. Детков В.А., Ивашин В.В., Щадин П.Ю. Импульсные электромагнитные сейсмоисточники «Енисей»: особенности технического решения и применения // Приборы и системы разведочной геофизики. – Саратов, 2007. – № 4.– С. 13–14.
- Анкушев В.В., Гурьев С.В., Резвов В.И. Компания «ГЕОСЕЙС» представляет новый импульсный источник возбуждения «Геотон» // Приборы и системы разведочной геофизики. – Саратов, 2003. – № 1. – С. 11–12.
- 9. Патент 2172496 РФ: МКИ Н 02 М 3/135. Импульсный электромагнитный привод невзрывного сейсмоисточника / Ивашин В.В., Певчев В.П.; заявл. 23.02.2000; опубл. в Бюл. № 23, 2001.
- 10. *Певчев В.П.* Особенности системы импульсного питания электромагнитного двигателя источника сейсмических волн // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2009. № 3.– С. 47–50.
- Певчев В.П. Выбор параметров элементов конструктивной схемы импульсного источника сейсмических волн // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2012. – № 2. – С. 133–141.
- Певчев В.П. Анализ влияния механических нагрузок на конструкцию якоря короткоходового электромагнитного двигателя сейсмоисточника и возможностей их снижения // Известия вузов. Электромеханика. – 2016. – № 6.– С. 30–34.
- Яблонский А.А. Курс теоретической механики. Ч. 2. Динамика: Учебник для технических вузов. М.: Высшая школа, 1984. 423 с.
- 14. Ивашин В.В. Электрическая схема-аналог ударного взаимодействия трех масс через согласующий механический преобразователь // Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии: Труды II Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Ч. 1. Тольятти: ТГУ, 2009. С. 372–374.
- Харкевич А.А. Избранные труды. В 3 т. Т. 1. Теория электроакустических преобразователей. Волновые процессы. – М.: Наука, 1973. – 399 с.
- 16. Тарг С.М. Краткий курс теоретической механики: Учеб. для втузов. 10-е изд. М.: Высшая школа, 1986. 416 с.
- 17. Гамбурцев Г.А. О составлении электромеханических аналогий // Доклады Академии наук. 1935. № 8–9. С. 303.
- Певчев В.П., Позднов М.В., Прядилов А.В. Математическое моделирование работы электромагнитного сейсмоисточника со свободным разгоном якоря // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2011. – № 4(18). – С. 71–74.
- Патент 2466429 РФ: G01V 1/155. Импульсный электромагнитный источник сейсмических волн / Иванников Н.А., Ивашин В.В., Певчев В.П., Прядилов А.В.; Заявл. 04.05.2011; Опубл. 10.11.2012 в Бюл. № 31.
- Смирнов В.П. Технические средства и содержание проверки источников ряда «Енисей» в цикле накопления одиночных и групповых воздействий // Приборы и системы разведочной геофизики. – Саратов, 2005. – № 4. – С. 38–45.

Статья поступила в редакцию 22 февраля 2018 г.

MODELING OF THE PROCESS OF COLLISION OF THE ARMATURE WITH THE INDUCTOR IN THE PULSED ELECTROMAGNETIC SOURCE OF SEISMIC WAVES

A.S. Anufriev¹, V.P. Pevchev²

¹ Samara State Technical University 244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

² Toll'yatti State University 14, Belorusskaya st., Toll'yatti, 445020, Russian Federation

Abstract. In many devices when triggered arise impact a massive elements. The impact can be as one of the main stages of the process of operation, determining the transmission of mechanical energy to the load, also unwanted constraint resource settings. These required when calculation of collision force and mechanical stress is very important. The article proposed a computer model for calculating process of impact of massive elements of seismic waves source. The model is presented in the form of a diagram, including mechanical and acoustic subsystems. It allows using simple actions to group in one calculation processes in the subsystems of different physical nature. The model allows us to perform multiple test devices, which is in the process of actuation are very important stages of energy transfer by shock-interaction of the massive elements, and other devices, the characteristics of which are to some extent determined by the presence of interactions of shock type.

Keywords: analogy, acoustic circuit, bipolar circuit element of the mass, dual conversion, interaction, computer model, short stroke electromagnetic engine, mechanical circuit, generalized coordinates, parameters, impact, source of seismic waves, seismic exploration.

Andrey S. Anufriev, Postgraduate Student. Vladimir P. Pevchev (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.

УДК 621.313

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ БЕСЩЕТОЧНОГО ГЕНЕРАТОРА С ИНТЕГРИРОВАННЫМ ВОЗБУДИТЕЛЕМ

Ю.В. Зубков

Самарский государственный технический университет Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Аннотация. При разработке бесщеточных электрических генераторов (БЭГ) для автономных энергетических установок важными являются вопросы обеспечения качества вырабатываемой электроэнергии и достижения улучшенных массогабаритных и энергетических показателей. Эти проблемы решаются посредством применения новых конструктивных и схемных решений при проектировании и производстве БЭГ. Экспериментальная проверка реализованных технических идей, подтверждающая адекватность теоретических моделей и соответствие качества БЭГ, является актуальной задачей. Экспериментальные исследования проведены на опытных образцах БЭГ с интегрированным возбуждением. Приведены энергетические и массогабаритные показатели разработанных генераторов и их аналогов, исследованы статические и динамические характеристики. Подтверждено качество электрической энергии, генерируемой БЭГ. Определены постоянные времени, характеризующие быстродействие системы стабилизации напряжения по контуру возбуждения.

Ключевые слова: бесщеточный генератор, экспериментальные исследования, статические и динамические характеристики.

В современных публикациях по теоретическому исследованию и практической реализации электромашинных источников электроэнергии малой и средней мощности для автономных энергетических установок (АЭУ) большое внимание уделяется бесщеточным генераторам с электромагнитным возбуждением [1-4]. В таких источниках, обеспечивающих электрической энергией потребителей, остро нуждаются, например, автомобильная промышленность, авиация, бронетанковая техника нового поколения с повышенной энерговооруженностью. К ним часто предъявляются жесткие требования по массе и габаритным размерам ввиду их размещения в зоне главных двигателей. Эти машины эксплуатируются при повышенной температуре окружающей среды, достигающей 100 °С, что предполагает нагрев активных частей генератора до 200 °С и выше. Столь жесткие условия накладывают существенные ограничения при выборе проводниковых и изоляционных материалов.

В то же время современные отечественные потребители, эксплуатирующие АЭУ, не спешат с заменой устаревших, морально изношенных, зачастую коллекторных электромашинных источников на современные бесщеточные.

В период с 2014 по 2017 гг. сотрудники кафедры «Электромеханика и автомобильное электрооборудование» СамГТУ совместно с НПО «Шторм» участвовали в разработке и освоении опытной партии бесщеточных электрических генераторов для ОАО «Барнаултрансмаш», которые предназначались для замены

Зубков Юрий Валентинович (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Электромеханика и автомобильное электрооборудование».

применяемых ранее коллекторных генераторов. В процессе работы ставилась задача повышения удельной мощности и улучшения энергетических показателей. В результате проведенной работы были спроектированы, изготовлены и прошли исследовательские испытания [5] синхронный генератор Г-408, выполненный по каскадной схеме [6], и бесщеточный электрический генератор с интегрированным возбуждением Г-409 [7].

Для сравнения основных характеристик разработанных и серийно выпускаемых промышленностью генераторов, предназначенных для использования на стационарных агрегатах и передвижных транспортных средствах в качестве низковольтных источников постоянного тока, были определены следующие электрические генераторы:

– генератор с когтеобразным индуктором ВГ-8К1;

коллекторный генератор ВГ-7500.

Основные технические данные выпускаемых промышленностью и разработанных авторским коллективом генераторов приведены в таблице.

Поромотр	Тип генератора			
Параметр	ВГ-8К1	ВГ-7500	Γ-408	Г-409
Номинальная мощность P_{H} , кВт	8	9	18	12
Номинальное напряжение U_{H} , В	28,5	28,5	28,5	28,5
Номинальная частота вращения n_{H} ,	3000	7200	7200	7340
об/мин				
Рабочий диапазон частот вращения,	2500÷6500	4000÷8000	4000÷8000	4000÷8000
об/мин				
Температура окружающей среды	-50÷+60	-50÷+70	-50÷+100	-50÷+100
$T_{o\kappa p}$, °C				
Масса М, кг	60	26	32	20
Удельная масса <i>m</i> , кг/кВт	7,5	2,9	1,78	1,67
Удельная мощность <i>р</i> , кВт/кг	0,13	0,35	0,56	0,60
Мощность возбуждения $P_{f_{\mathcal{H}}}$, Вт	250	266	232	178
Коэффициент усиления по мощно-	32	34	78	67
сти <i>k</i> _{<i>P</i>} , о.е.				
Номинальный КПД η_{H} , o.e.	0,75	0,77	0,75	0,8

Технические данные генератора с интегрированным возбудителем и его аналогов

Анализируя данные таблицы, можно заметить, что генератор с интегрированным возбуждением превосходит по основным критериям (удельная мощность, КПД, мощность возбуждения) не только генераторы с клювообразным ротором, двухкаскадный синхронный, но и коллекторный генератор. Таких результатов удалось достичь прежде всего за счет реализации разработанных при синтезе процедур оптимизационного поиска и применения новых авторских технических решений.

С целью проверки адекватности теоретических моделей, лежащих в основе разработки генератора, опытный образец БЭГ с интегрированным возбудителем подвергался испытаниям на соответствие статическим и динамическим показателям: величина изменения и качество выходного напряжения, значение постоянных времени переходных процессов по управляющему и возмущающему воздействиям, точность стабилизации напряжения при изменении нагрузки и т. д.

На рис. 1, 2 показаны экспериментальные (сплошная линия) и рассчитанные по математической модели (прерывистая линия) внешние характеристики в разомкнутой и замкнутой системе стабилизации напряжения соответственно.



Рис. 1. Внешние характеристики БЭГ при: 1 – 7200 об/мин; 2 – 6000 об/мин; 3 – 5000 об/мин; 4 – 4000 об/мин; 5 – 3000 об/мин

Относительное расхождение экспериментальных и теоретических характеристик не превышает 7 %, что указывает на адекватность используемой математической модели. Система автоматического регулирования поддерживает стабильное напряжение в диапазоне изменения нагрузки $(0,05 \div 1,05) I_{d_H}$.



Автором предложено оригинальное техническое решение, позволяющее стабилизировать выходное напряжение БЭГ посредством воздействия на величину тока возбуждения основного генератора. На рис. 3 показана принципиальная электрическая схема, поясняющая суть решения.

БЭГ состоит из $2p_2$ -полюсного синхронного генератора (СГ) с обмоткой возбуждения w_2 на роторе и m_S -фазной якорной обмоткой w_S на статоре, подключенной к выпрямителю В2. К выходным зажимам последовательно с нагрузкой подключена однофазная обмотка w_0 , выполненная с числом полюсов $4p_2 \cdot m_S$. В магнитную систему генератора интегрирован возбудитель (СВ), представляющий собой $2p_1$ -полюсную трехфазную синхронную машину с обмоткой возбуждения w_f на статоре и обмоткой якоря w_R на роторе, которая подключена к обмотке возбуждения генератора w_2 через однополупериодный выпрямитель В1. Обмотка w_R выполнена электрически совмещенной и возбуждает одновременно $2p_1$ -полюсное вращающееся и $2p_3 = 3 \cdot 2p_1$ -полюсное неподвижное в пространстве магнитные поля.



Рис. 3. Электрическая схема БЭГ с компаундированием

Генератор работает следующим образом. При питании обмотки w_f постоянным током и вращении ротора в обмотке w_R индуктируется ЭДС частоты $f_R = \frac{p_1 \cdot n}{60}$ и по обмоткам w_R и w_2 протекает выпрямленный ток. Переменная составляющая этого тока в обмотке w_R создает магнитное поле реакции якоря возбудителя. Обмотка w_2 , обтекаемая выпрямленным током, создает поле возбуждения основного генератора, которое при вращении ротора индуктирует в силовой обмотке w_S ЭДС частоты $f_S = \frac{p_2 \cdot n}{60}$. При работе под нагрузкой по обмотке w_0 протекает ток, величина которого определяется сопротивлением нагрузки и суммой ЭДС обмотки w_S и ЭДС, индуктируемой в обмотке w_0 2 p_3 -полюсным магнитным полем, созданным постоянной составляющей тока обмотки w_R . Таким образом, за счет магнитной связи обмоток w_R и w_0 при уменьшении нагрузки и увеличении выпрямленного напряжения U_d ток в обмотке w_R уменьшается, что приводит в итоге к падению ЭДС обмотки w_S и уменьшению выходного напряжения БЭГ.

Помимо эффекта стабилизации напряжения при изменении нагрузки предложенная схема БЭГ дает существенное снижение пульсации выпрямленного напряжения. Например, при работе в режиме холостого хода выходное напряжение БЭГ содержит кроме постоянной составляющей переменную, частота которой в $2m_S$ раз выше частоты ЭДС обмотки w_S . Постоянная составляющая тока

обмотки w_R индуктирует в обмотке w_0 ЭДС частоты $f_0 = \frac{p_3 \cdot n}{60} = 2m_S \cdot f_S$. Обмотка w_0 включена последовательно в цепь нагрузки таким образом, что ее ЭДС сдвинута по фазе на угол 180° относительно переменной составляющей напряжения U_d . На рис. 4 показана форма выходного выпрямленного напряжения U_d , ЭДС обмотки w_0 и напряжения на нагрузке.



Рис. 4. Пульсации выходного напряжения БЭГ



Рис. 5. Напряжение холостого хода $n = 7200 \frac{o \delta}{M U_{d}}, U_{d} = 59B, k_{nyn} = 8,5\%$

За счет реализации предложенного технического решения коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения $k_{ny,nU}$ был снижен по сравнению с аналогами на $(2 \div 4)$ %.

Оценка качества генерируемой БЭГ энергии получена из экспериментальных осциллограмм, показанных на рис. 5, 6.



Рис. 6. Осциллограммы напряжения и тока при нагрузке $U_d = 53B$, $I_d = 105A$

Регистрация данных проводилась цифровым осциллографом АКИП 4115А с использованием датчика тока компенсационного типа LTC 1000-SI/SP98 для электронного преобразования тока – постоянного, переменного, импульсного в пропорциональный выходной ток с гальванической развязкой между первичной (силовой) и вторичной (измерительной) цепями.

На рис. 7 показана осциллограмма переходного процесса в цепи якоря БЭГ при включении возбуждения в нагрузочном режиме работы.



Рис. 7. Осциллограмма выпрямленного напряжения и тока при включении возбуждения в режиме номинальной нагрузки $U_d = 28B$, $I_d = 650A$

Анализ переходного процесса показывает, что время установления напряжения в обмотке якоря при внезапном изменении напряжения возбуждения не превышает в нагрузочном режиме 50 мс, что указывает на хорошее быстродействие БЭГ по контуру регулирования напряжения. Электромагнитная постоянная времени генератора как объекта регулирования, наибольший вклад в величину которой вносит индуктивность обмотки возбуждения возбудителя, весьма близка к расчетной теоретической величине $T_{_{2M}} = 0,058$ с.

При исследовании магнитного поля генератора методом конечных элементов установлено, что с точки зрения увеличения быстродействия системы автоматического регулирования напряжения магнитную систему возбудителя следует выполнять более насыщенной.

Выводы

1. Теоретические положения и практические рекомендации, изложенные в настоящей статье, стали основой при разработке гаммы бесщеточных синхронных машин малой и средней мощности (генераторов с интегрированным возбуждением), изготовленных и испытанных на профильных предприятиях электротехнической отрасли.

2. Результаты испытаний бесщеточного генератора с интегрированным возбуждением, изготовленного НПО «Шторм» по заказу АО «Барнаултрансмаш», подтвердили все основные теоретические положения и рекомендации, предложенные автором. Генератор отличается от известных аналогов повышенным на 7 % КПД, сниженной на 70 % удельной массой, более высоким быстродействием по цепям возбуждения и нагрузки.

3. Адекватность моделей генератора с интегрированным возбуждением по длительности, характеру переходных процессов подтверждена экспериментальными данными.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Зубков Ю.В. Имитационное моделирование вентильного генератора совмещенного типа // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. 2016. № 1(49). С. 96–102.
- Nøland J.K. Design and characterization of a rotating brushlessouter pole PM exciter for a synchronous generator / J.K. Nøland, F. Evestedt, J.J. P'erez-Loya [et al] // IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 14, no. 8, 2015. – P. 1–11.
- 3. *Shahnazari M.* Improved dynamic average modeling of brushless excitation system in allrectification modes / M. Shahnazari, A. Vahedi // IET Electric Power Applications. 2010, vol. 4, no. 8. P. 657–669.
- 4. *Yu W.* Comparison of hybrid excitation topologies for flux-switching machines / W. Yu, D. Zhiguan // IEEE Trans. Magn., 48(9), 2017. P. 2518–2527.
- 5. *Жерве Г.К.* Промышленные испытания электрических машин. Л.: Энергоатомиздат, 1984. 407 с.
- 6. Бут Д.А. Бесконтактные электрические машины. М.: Высшая школа, 1985. 225 с.
- Зубков Ю.В., Давидков А.И. Бесщеточный генератор с интегрированным гибридным возбуждением // Труды Международной научно-практической конференции «Ашировские чтения», Самара, 2017. – С. 686–691.

Статья поступила в редакцию 3 февраля 2018 г.

EXPERIMENTAL STUDY OF BRUSHLESS GENERATOR WITH INTEGRATED EXCITER

Yu.V. Zubkov

Samara State Technical University 244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

Abstract. When developing brushless electric generators (BEG) for autonomous power plants, it is important to ensure the quality of generated electricity and achieve improved mass and size and energy performance. These problems are solved through the use of new design and circuit solutions in the design and production of BEG. The experimental verification of realized technical ideas, confirming the adequacy of theoretical models and the conformity of BEG quality, is an actual task. Experimental studies were carried out on experimental BEG samples with integrated excitation. Energy and mass-dimensional parameters of the developed generators and their analogs are given, static and dynamic characteristics are investigated. The quality of electrical energy generated by BEG was confirmed. The time constants characterizing the speed of the voltage stabilization system along the excitation circuit are determined.

Keywords: brushless generator, experimental studies, static and dynamic characteristics.

Yuriy V. Zubkov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.

УДК 621.92

СИНТЕЗ КОРРЕКТИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ЗАМКНУТОГО КОНТУРА СКОРОСТИ С ЦИФРОВЫМ РЕГУЛЯТОРОМ ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННОГО ПОЗИЦИОННО-СЛЕДЯЩЕГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

В.Е. Лысов, Я.И. Пешев

Самарский государственный технический университет Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: 67lysov@mail.ru

Аннотация. Позиционно-следящие электроприводы являются основными при подаче подвижных органов станка и реализующих сложные движения инструментов. Динамика электроприводов определяет точность обработки или изменения. Для достижения высоких динамических показателей качества управления необходимо обеспечить апериодический переходный процесс при переходе с одной скорости на другую. В этом случае обеспечивается высокая точность позиционирования и лучиие показатели по чистоте обрабатываемой детали. В статье рассматриваются необходимые условия для обеспечения апериодического переходного процесса в цифровой системе управления частотой вращения электродвигателя. Представлена методика дополнительной коррекции системы, обеспечивающая требуемые показатели. Теоретические положения подтверждены результатами моделирования.

Ключевые слова: дискретность, цифровой регулятор положения, экстраполятор нулевого порядка, прецизионный металлорежущий станок.

Прецизионные координатно-расточные станки, координатно-измерительные машины, опорно-поворотные устройства телескопов [1, 2] оснащаются позиционно-следящими электроприводами постоянного или переменного тока [3, 4]. Упомянутые электроприводы способны отрабатывать сложные траектории перемещения со статической точностью позиционирования до 0,1 мкм или 0,1 угловых секунд [5]. Достижение высоких точностных показателей при высокой производительности возможно только при обеспечении плавности перемещений исполнительных органов и одностороннего подхода к заданной координате. Это, в свою очередь, возможно только в случае перехода с одной скорости вращения вала двигателя на другую по апериодическому (экспоненциальному) закону, что позволяет исключить негативное влияние люфта в кинематической цепи и гистерезиса электромеханических узлов на точностные показатели. Стабильность перемещения исполнительного органа при стабильной скорости вращения вала двигателя при вариации возмущающих воздействий также позволяет обеспечить высокую динамическую точность воспроизведения заданной траектории.

Известно [7, 8], что позиционно-следящие системы (ПСС) структурно формируются по схеме подчиненного регулирования (СПР).

Лысов Владимир Ефимович (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Электропривод и промышленная автоматика».

Пешев Ярослав Иванович (к.т.н.), старший преподаватель кафедры «Электропривод и промышленная автоматика».

Аналоговые ПСС, настроенные на технический оптимум, имеют желаемую передаточную функцию разомкнутого контура скорости в виде

$$W_{RG_{A}}(p) = \frac{1}{4T_{CP} p(2T_{CP} p + 1)},$$
(1)

а при замкнутом контуре скорости

$$W_{ZG_{-}A}(p) = \frac{1}{8T_{CP}^2 p^2 + 4T_{CP}p + 1} \cdot \frac{1}{K_{OCC}}.$$
(2)

В (1, 2) обозначены: *Т*_{*CP*} – малая постоянная времени силового преобразователя; *К*_{*OCC*} – коэффициент передачи цепи обратной связи.

Передаточная функция (2) обеспечивает при единичном ступенчатом входном управляющем воздействии переходный процесс с перерегулированием $\sigma = 4,3\%$.

Примерно такого же значения перерегулирования достигает контур скорости, настроенный на симметричный оптимум, с фильтром на входе управляющего воздействия [7].

Наличие перерегулирования принципиально недопустимо в прецизионном электроприводе. Управление скоростью цифровым регулятором приводит к еще большему значению перерегулирования, так как в этом случае в структуре контура скорости присутствует экстраполятор нулевого порядка.

В данной статье определены условия для формирования в замкнутом контуре скорости с цифровым регулятором апериодического переходного процесса изменения скорости вращения вала двигателя при единичном ступенчатом входном управляющем воздействии. Структурная схема упомянутого замкнутого контура скорости имеет вид, показанный на рис. 1, на котором введены следующие обозначения: $W_{HLD}(p)$ – передаточная функция экстраполятора нулевого порядка; $\frac{1}{4T_{CP} p(2T_{CP} p+1)}$ – передаточная функция разомкнутого контура ско-

рости при настройке на технический оптимум; *К*_{ОСС} – коэффициент передачи обратной связи по скорости.



Рис. 1. Структурная схема контура скорости с экстраполятором нулевого порядка

Необходимым условием формирования апериодического переходного процесса дискретной системы при нулевых начальных условиях является создание для замкнутого контура скорости передаточной функции в форме Z-преобразования, которая должна иметь следующий вид:

$$W_{ZG_{-D}}(Z) = \frac{\omega(Z)}{U_{ZS}(Z)} = \frac{d}{Z - d}$$
 (3)

В (3) обозначены: $W_{ZG_D}(Z)$ – желаемая передаточная функция замкнутой дискретной системы (контур скорости); ω – угловая скорость вращения вала двигателя; U_{ZS} – управляющее входное воздействие (сигнал задания скорости); $-\frac{T}{T}$

 $d = e^{-T_1}$, причем T – период дискретизации экстраполятора нулевого порядка, T_1 – постоянная времени апериодического звена ($2T_{CP}=T_1$ (см. рис. 1)).

Согласно свойству Z-преобразования [8], установившееся значение скорости вращения вала двигателя $\omega_{SET}(t)$ при действии единичного ступенчатого управляющего воздействия 1(t) определяется зависимостью

$$\omega_{SET_D}(t) = \frac{d}{Z-d} \cdot \frac{Z}{Z-1}(Z-1) = \frac{d}{1-d}.$$
(4)

В (4) обозначено: $\omega_{SET_D}(t)$ – установившаяся скорость вращения вала двигателя дискретной системы. Из (4) следует, что уровень установившегося значения $\omega_{SET_D}(t)$ зависит от соотношения $\frac{T}{T_1}$. В этой связи полученное значение

 $\omega_{SET_D}(t)$ по формуле (4) следует умножить на коэффициент $\alpha = \frac{\omega_{SET_A}(t)}{\omega_{SET_D}(t)}$.

С учетом сделанного замечания зависимость (4) примет вид

$$\omega_{SET_D}(t) = \frac{d\alpha}{1-d} \,. \tag{5}$$

Значение $\omega_{SET_A}(t) = \frac{1}{K_{OCC}}$.

Начальное значение переходного процесса определяется соотношением [8]

$$\omega_{SET_D}(t) = \lim_{Z \to \infty} \left[\frac{Z}{Z-1} \cdot \frac{d}{Z-d} \right] = 0.$$
(6)

Переходный процесс с последующей оценкой динамических показателей качества управления определяется зависимостью

$$\omega(Z) = U_{ZS}(Z) \frac{d\alpha}{Z-d} = \frac{Z}{Z-1} \cdot \frac{d\alpha}{Z-d}$$
(7)

путем разложения в ряд Лорана [8].

Как было отмечено выше, введение экстраполятора нулевого порядка приводит к повышенному значению перерегулирования. В этой связи необходима дополнительная коррекция системы. Это, в свою очередь, требует найти желаемую передаточную функцию системы в форме Z-преобразования. Исходя из зависимости (3) значение $W_{RG\ D}(Z)$ определяется

$$W_{RG_{-}D}(Z) = \frac{U_{HLD}(Z)}{U_{ZS}(Z)} = \frac{d}{Z - 2d}.$$
 (8)

Для определения периода дискретности Т необходимо знать полосу пропускания аналоговой части системы. Из зависимости (1) следует, что коэффициент

передачи равен
$$K_{RG_A} = \frac{1}{4T_{CP}}$$
 и $\omega_C = \frac{1}{4T_{CP}}$

Согласно теореме Шеннона – Котельникова, для достижения показателей качества управления, отличающихся не более чем на 3 % от аналогового прототипа, необходимо обеспечить соотношение между частотой квантования экстраполятора нулевого порядка ω_0 и частотой среза аналоговой части системы ω_C

в виде $\frac{\omega_0}{\omega_C} \ge 24$ [9].

С учетом полученных параметров значение передаточной функции разомкнутой системы с учетом экстраполятора нулевого порядка определяется соотношением [8]

$$W_{R_{-}HLD}(Z) = \frac{Z-1}{Z} Z \left[\frac{1}{4T_{CP} p^2 (2T_{CP} p+1)} \right].$$

После применения Z-преобразования получим

$$W_{R_{HLD}}(Z) = \left[\frac{T(Z-d) - T_1(1-d)(Z-1)}{(Z-1)(Z-d)}\right] K_{RG_A}.$$
(9)

В (9) обозначено: Т – период дискретности экстраполятора нулевого порядка; T_I – постоянная времени апериодического звена; $d = e^{-\frac{T}{T_1}}$.

Значение *T* определяется из соотношения $T = \frac{2\pi}{\omega_0}$, а также: $T_1 = 2T_{CP}$,

 $K_{RG_A} = \frac{1}{4T_{CP}}.$

Применим к полученному выражению билинейное преобразование [8]

$$Z = \frac{1+w}{1-w} \,. \tag{10}$$

В результате применения (10) получим

$$W_{R_{-HLD}}(w) = \frac{\left(1 - w\right)\left[T\left(1 + \frac{w(1+d)}{1-d} - 2wT_{1}\right)\right]}{2w\left(1 + \frac{w(1+d)}{1-d}\right)}.$$
(11)

Заменив в (11) $w = j\lambda \frac{T}{2}$, где λ – псевдочастота [8], найдем выражение для амплитудно-фазовой характеристики разомкнутой системы с экстраполятором нулевого порядка:

$$W_{R_{-}HLD}\left(j\lambda\frac{T}{2}\right) = \frac{\left(1-j\lambda\frac{T}{2}\right)\left[T\left(1+\frac{j\lambda\frac{T}{2}(1+d)}{1-d}-2j\lambda\frac{T}{2}T_{1}\right)\right]}{2j\lambda\frac{T}{2}\left(1+j\lambda\frac{T}{2}\frac{1+d}{1-d}\right)}.$$
(12)

Для обеспечения апериодического переходного процесса найдем выражение для желаемой АФЧХ дискретной системы в области псевдочастот. Из зависимости (8) следует

$$W_{RG_{-}D}(w) = \frac{d}{\frac{1+w}{1-w} - 2d}.$$
 (13)

Заменив в (13) $w = j\lambda \frac{T}{2}$, получим

$$W_{RG_D}\left(j\lambda\frac{T}{2}\right) = \frac{d\left(1-j\lambda\frac{T}{2}\right)}{\left(1-2d\right)+j\lambda\frac{T}{2}\left(1+2d\right)}.$$
(14)

Для достижения требуемых показателей качества управления необходимо включить в структуру контура скорости последовательное корректирующее устройство исходя из зависимости

$$W_{CU}\left(j\lambda\frac{T}{2}\right) = \frac{W_{RG_{-}D}\left(j\lambda\frac{T}{2}\right)}{W_{R_{-}HLD}\left(j\lambda\frac{T}{2}\right)}.$$
(15)

Рассмотренную методику, обеспечивающую апериодический переходный процесс изменения скорости вращения вала двигателя по единичному ступенчатому управляющему воздействию, проиллюстрируем на конкретном примере.

Примем следующие значения параметров контура скорости: $T_{CP}=0,01$ sec, $K_{OCC}=0,064$ V*sec.

По вышеприведенным данным на рис. 2 построена ЛАФЧХ аналогового разомкнутого контура скорости, настроенного на технический оптимум (характеристики 1, 2 на рис. 2). Для построения были рассчитаны следующие значения:

20lg
$$K_{RG_A} = 20$$
lg $\frac{1}{4T_{CP}} = 28$ dB, $\omega_1 = \frac{1}{T_1} = \frac{1}{2T_{CP}} = 50$ sec⁻¹, lg $\omega_1 =$ lg 50 = 1,7dec.
Из построения следует, что частота $\omega_C = \frac{1}{4T_{CP}} = 25$ sec⁻¹, или

 $\lg \omega_C = \lg 25 = 1,4 \text{dec.}$

Согласно вышеприведенной рекомендации выбора частоты квантования экстраполятора нулевого порядка [9] находим: $\omega_0 = 24\omega_C = 600 {\rm sec}^{-1}$.

По полученному значению ω_0 определяем период квантования экстраполя-

тора нулевого порядка $T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 0.01 \text{sec}$.

С учетом полученных значений передаточная функция аналоговой части контура скорости с экстраполятором нулевого порядка, которая была получена в (9), примет вид

$$W_{R_{-}HLD}(Z) = \frac{0,05(Z+1)}{(Z-1)(Z-0,6)}$$



Рис. 2. Логарифмические амплитудно-фазовые частотные характеристики разомкнутого контура скорости:

1, 2 – ЛАФЧХ разомкнутого аналогового контура скорости;

3, 4 – ЛАФЧХ разомкнутого аналогового контура скорости с экстраполятором нулевого порядка;

5, 6 – ЛАФЧХ разомкнутого дискретного контура скорости;

7, 8 – ЛАФЧХ корректирующего устройства

Переходя последовательно с помощью билинейного преобразования (10, 11), получаем выражения для АФЧХ системы в области псевдочастот (12). Из полученной зависимости находим

$$W_{R_{-}HLD}\left(j\lambda\frac{T}{2}\right) = \frac{25(1-j\lambda0,005)}{j\lambda(0,02j\lambda+1)}$$

По полученному выражению для АФЧХ построены соответствующие характеристики (характеристики 3, 4 на рис. 2). Сравнение характеристик 1, 3 и 2, 4, показанных на рис. 2, доказывает положение об ухудшении динамических показателей качества управления в замкнутом контуре скорости.

Для обеспечения апериодического переходного процесса изменения скорости вращения вала двигателя при единичном ступенчатом управляющем воздействии построим желаемую АФЧХ согласно зависимости (14):

$$W_{RG_{D}}\left(j\lambda \frac{T}{2}\right) = \frac{3(1-j\lambda 0,005)}{(0,055j\lambda - 1)}.$$
(16)

Используя выражение (16), построим ЛАФЧХ (характеристики 5, 6 на рис. 2), для чего рассчитаем значения: $20 \lg 3 = 9,5 dB$; $\lambda_1 = \frac{1}{0,005} = 200 \sec^{-1}$;

lg 200 = 2,3dec;
$$\lambda_2 = \frac{1}{0,055} = 18,18 \text{sec}^{-1}$$
; lg 18,18 = 1,26dec.

Согласно зависимости (15) и построенным характеристикам 3, 4, 5, 6 (см. рис. 2) найдем выражение для АФЧХ и ЛАФЧХ корректирующего устройства:

$$W_{CU}\left(j\lambda\frac{T}{2}\right) = \frac{W_{RG_{-}D}\left(j\lambda\frac{T}{2}\right)}{W_{R_{-}HLD}\left(j\lambda\frac{T}{2}\right)} = \frac{0.12(1+j\lambda0.02)j\lambda}{0.055j\lambda-1},$$
(17)

при этом 201g 0,12 = -18,4dB.

По выражению (17) на рис. 2 построена ЛАФЧХ корректирующего устройства (характеристики 7, 8).



Рис. 3. Структурные схемы замкнутого контура стабилизации скорости: *a* – аналоговый замкнутый контур скорости;

б – дискретный замкнутый контур скорости;

г – дискретный замкнутый контур скорости с корректирующим устройством

Применив Z-преобразование к (17), можно получить реализацию корректирующего устройства в цифровом виде. Для этого воспользуемся соотношениями

$$j\lambda = \frac{2w}{T}, w = \frac{Z+1}{Z-1}, Z = e^{pT} \approx \frac{1+\frac{pT}{2}}{1-\frac{pT}{2}}.$$

В результате преобразований получим

$$L_{CU}(Z) = \frac{12(Z-1)(Z-0,6)}{(Z+1)(Z-1,2)}$$

или

$$L_{CU}(p) = \frac{0.12p(0.02p-1)}{0.055p-1}$$

По полученным зависимостям составляется структурная схема корректирующего устройства.

Структурные схемы математических моделей представлены на рис. 3 (а, б, в).

Проведенные аналитические исследования подтверждены имитационным моделированием в среде Matlab.



Рис. 4. Переходные процессы изменения скорости по управляющему единичному ступенчатому воздействию для различных структур замкнутых контуров скорости

На рис. 4 представлены переходные процессы изменения скорости по управляющему единичному ступенчатому воздействию для следующих случаев: аналоговый замкнутый контур скорости при настройке на технический оптимум (кривая 1); дискретный замкнутый контур скорости при настройке на технический оптимум (кривая 2); дискретный замкнутый контур скорости, имеющий в своей структуре корректирующее устройство (кривая 3). Анализ результатов имитационного моделирования подтверждает увеличение перерегулирования при наличии в структуре замкнутого контура скорости экстраполятора нулевого порядка до 9 % при условии изначальной настройки на технический оптимум. Также доказывается адекватность предложенных условий по обеспечению апериодического переходного процесса изменения скорости вращения вала двигателя в замкнутом контуре скорости с экстраполятором нулевого порядка при единичном ступенчатом управляющем воздействии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. *Михайлов О.П., Орлова Р.Т.* Современный электропривод станков с ЧПУ и промышленных роботов. М. : Высшая школа, 1989. 111 с.
- 2. Садовников А.А., Томасов В.С., Толмачёв В.А. Электропривод для оптических комплексов контроля космического пространства // Известие вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54. № 6. С. 81–86.
- Балковой А.П., Цаценкин В.К. Прецизионный электропривод с вентильным двигателем. М.: Машиностроение, 2010. – 328 с.
- Technical manual TNC620. DR JOHANNES HEIDENHAIN GmbH, 83301 Traunreut, Germany. Oktober 2010.
- 5. *Решетов Д.Н., Портман В.Г.* Точность металлорежущих станков. М.: Машиностроение, 1986. 336 с.
- 6. Manfred Weck. Werkzeugmaschinen 3 : Mechatronische Systeme, Vorschubantriebe, Prozessdiagnose. – Springer Berlin Heidelberg, 2006. – 424 p.
- 7. *Рапопорт Э.Я.* Системы подчиненного регулирования электроприводов постоянного тока. Конспект лекций. Куйбышев, 1985. 56 с.
- 8. Лысов В.Е. Теория автоматического управления. М.: Машиностроение, 2010.
- Лысов В.Е., Сидоров И.С. Анализ погрешности в воспроизведении заданной траектории движения позиционно-следящего электропривода с экстраполятором нулевого порядка // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2015. – № 4 (48). – С. 70–75.

Статья поступила в редакцию 12 января 2018 г.

SYNTHESIS OF CORRECTIVE DEVICE FOR A CLOSED-LOOP SPEED CONTROL WITH DIGITAL SPEED REGULATOR FOR THE PRECI-SION POSITION-TRACKING SERVO DRIVE

V.E. Lysov, Y.I. Peshev

Samara State Technical University 244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

Abstract. Servo drives are the main ones when submitting the moving parts of the machine and realizing complex movements of the tools. The dynamics of electric drives determines the accuracy of processing or changes. To achieve high dynamic quality of control, it is necessary to provide an aperiodic transition process from one speed to another. In this case, high positioning accuracy and better cleanliness of the workpiece are ensured. The paper considers the necessary conditions for providing an aperiodic transient process in a digital control system for the rotational speed of an electric motor. The paper describes the method of additional correction of the system providing the required parameters. The theoretical positions are confirmed by the results of the simulation.

Keywords: jig boring machine, position regulator, sampling rate, zero-order hold.

Vladimir E. Lysov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor. Yaroslav I. Peshev (Ph.D. (Techn.)), Senior Lecture.

УДК 621.3.078

АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ЧАСТОТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С ПРОСТЕЙШИМИ ЗАКОНАМИ КОММУТАЦИИ СИЛОВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

А.В. Стариков, С.Л. Лисин, Д.Ю. Рокало

Самарский государственный технический университет Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Аннотация. Рассмотрены выходные фазные напряжения частотных преобразователей с л-коммутацией транзисторов и трапецеидальной модуляцией. Найдены аналитические выражения для определения действующих значений напряжений для обоих случаев. Получены формулы для вычисления амплитуд основной и высших гармоник фазного напряжения рассматриваемых частотных преобразователей. Показано, что выходное напряжение инвертора с л-коммутацией транзисторов не соответствует требованиям к нормам качества электроэнергии. Проанализирован гармонический состав выходного сигнала частотного преобразователя, формирующего трапецеидальное фазное напряжение. Сделан вывод, что без учета процесса широтно-импульсной модуляции такой инвертор имеет малые амплитуды высших гармоник и соответствует требованиям государственного стандарта. Отмечено, что частотный преобразователь, формирующий трапецеидальное фазное напряжение, отличается простотой технической реализации и малыми коммутационными потерями в силовых транзисторах.

Ключевые слова: частотный преобразователь, фазное напряжение, гармонический состав, силовой транзистор, коммутационные потери.

Совершенствование микропроцессорной техники и в частности микроконтроллеров привело к тому, что в современных частотных преобразователях с широтно-импульсной модуляцией стали применять векторные модуляторы. В них заложены сложные законы формирования сигналов управления силовыми транзисторами, реализация которых требует больших вычислительных затрат. Действительно, при создании векторных модуляторов на каждом периоде широтно-импульсной модуляции необходимо производить несколько операций умножения и вычисления синусов. Именно поэтому для реализации современных частотных преобразователей необходимы микроконтроллеры с высокими тактовыми частотами. При этом перестали использовать простые законы коммутации транзисторов, например π -коммутацию [1, 2], которые не требуют какихлибо затрат вычислительной мощности микроконтроллера и реализуются простой логической схемой. Также не требуют никаких вычислений на периоде широтно-импульсной модуляции частотные преобразователи, формирующие трапецеидальную форму фазного напряжения [3].

Стариков Александр Владимирович (д.т.н.), заведующий кафедрой «Электропривод и промышленная автоматика».

Лисин Сергей Леонидович (к.т.н.), доцент кафедры «Электропривод и промышленная автоматика».

Даниил Юрьевич Рокало, аспирант.

Целью настоящего исследования является анализ максимальной величины действующего значения и гармонического состава выходного напряжения частотных преобразователей, использующих простые законы коммутации силовых транзисторов, выявление их недостатков и преимуществ

Проанализируем основные недостатки частотных преобразователей с π -коммутацией транзисторов. Фазное напряжение на выходе таких инверторов с учетом усреднения широтно-модулированного сигнала состоит из прямоугольников (рис. 1).



Рис. 1. Фазное напряжение на выходе частотного преобразователя с π-коммутацией транзисторов

Найдем действующее значение U_{rms}^{rec} рассматриваемого фазного напряжения, которое представляет собой среднеквадратичное значение функции, представленной на рис. 1. Очевидно, что среднеквадратичное значение, найденное на первом полупериоде, будет таким же, как и на втором полупериоде, поэтому

$$U_{rms}^{rec} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \left[\int_{0}^{\frac{\pi}{3}} \left(\frac{U_{m}^{rec}}{2} \right)^{2} d\theta + \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}} \left(U_{m}^{rec} \right)^{2} d\theta + \int_{\frac{2\pi}{3}}^{\pi} \left(\frac{U_{m}^{rec}}{2} \right)^{2} d\theta \right]} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\frac{\left(U_{m}^{rec} \right)^{2}}{4} \theta \Big|_{0}^{\frac{\pi}{3}} + \left(U_{m}^{rec} \right)^{2} \theta \Big|_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}} + \frac{\left(U_{m}^{rec} \right)^{2}}{4} \theta \Big|_{\frac{2\pi}{3}}^{\frac{\pi}{3}} \right]}$$
(1)

где $\theta = \omega t$, t – время, $\omega = 2\pi f_1$, f_1 – частота напряжения.

Подставляя в (1) пределы интегрирования, после несложных преобразований получим, что действующее значение фазного напряжения при прямоугольной форме равно

$$U_{rms}^{rec} = \frac{U_m^{rec}}{\sqrt{2}},$$

где U_m^{rec} – амплитуда прямоугольного напряжения.

При π -коммутации транзисторов максимальное величина $U_m^{rec} = \frac{2U_d}{3}$, где U_d – напряжение в линии постоянного тока частотного преобразователя. При $U_d = 515$ В, которое получается из трехфазной сети с линейным напряжением 380 В [3], максимальное действующее значение фазного напряжения $U_{rms}^{rec} = 242,77$ В. То есть по действующему напряжению частотные преобразова-

тели с π -коммутацией транзисторов имеют даже определенный запас относительно номинального напряжения асинхронного двигателя. Но очевидно, что несинусоидальность напряжения приведет к появлению в выходном сигнале инвертора высших гармонических составляющих.

Для определения амплитуд высших гармоник разложим в ряд Фурье периодическую функцию, представленную на рис. 1. Поскольку она является нечетной, то коэффициенты ряда Фурье будут определяться формулами [4]

$$a_n = 0; \ b_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} f(x) \sin nx dx,$$
 (2)

причем в нашем случае $x = \theta$.

Иначе говоря, искомые коэффициенты тригонометрического ряда Фурье можно найти от функции, приведенной на рис. 2.



Рис. 2. Функция, которую необходимо разложить в ряд Фурье, определенная на половине периода

Ее можно представить в виде суммы трех составляющих

 $f(x) = f_1(x) + f_2(x) + f_3(x),$ где $f_1(x) = \frac{U_m^{rec}}{2}$ при $0 \le x \le \frac{\pi}{3}; f_2(x) = U_m^{rec}$ при $\frac{\pi}{3} \le x \le \frac{2\pi}{3}; f_3(x) = \frac{U_m^{rec}}{2}$ при $\frac{2\pi}{3} \le x \le \pi$.

Следовательно, коэффициенты (2) разложения в тригонометрический ряд Фурье рассматриваемой функции равны

$$b_{n}^{rec} = \frac{2}{\pi} \int_{0}^{\pi} f(x) \sin nx dx = \frac{2}{\pi} \int_{0}^{\pi} [f_{1}(x) + f_{2}(x) + f_{3}(x)] \sin nx dx =$$

$$= U_{m}^{rec} \left(\frac{2}{\pi} \int_{0}^{\frac{\pi}{3}} \frac{1}{2} \sin nx dx + \frac{2}{\pi} \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}} \sin nx dx + \frac{2}{\pi} \int_{\frac{2\pi}{3}}^{\frac{\pi}{3}} \frac{1}{2} \sin nx dx \right) =$$

$$= U_{m}^{rec} \left(-\frac{1}{n\pi} \cos nx \Big|_{0}^{\frac{\pi}{3}} - \frac{2}{n\pi} \cos nx \Big|_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}} - \frac{1}{n\pi} \cos nx \Big|_{\frac{2\pi}{3}}^{\frac{\pi}{3}} \right) =$$

$$= \frac{U_{m}^{rec}}{n\pi} \left(1 + \cos \frac{n\pi}{3} - \cos \frac{2n\pi}{3} - \cos n\pi \right); \quad a_{n} = 0.$$
(3)

Анализ формул (3) позволяет сделать вывод, что четные коэффициенты ряда равны нулю. Кроме того, можно вывести общее правило для определения коэффициентов (амплитуд) нечетных гармоник:

$$b_{2l+1} = 0, \ npu \ r = 0;$$

$$b_{2l+1} = \frac{3}{(2l+1)\pi} U_m^{rec}, \ npu \ r = 1 \ u \ r = 2,$$

$$(4)$$

где l = 0, 1, 2, 3... – целое число; r – целочисленный остаток от деления 2l + 1 на 3.

Из системы уравнений (4) следует, что гармоники с номером, кратным трем, отсутствуют в выходном сигнале частотного преобразователя с π -коммутацией транзисторов. Максимальная амплитуда первой гармоники равна $U_{1m}^{rec} = b_1 = \frac{3}{\pi} U_m^{rec} = \frac{2U_d}{\pi} = 327,86$ B, a ee действующее значение $U_{1rms}^{rec} = \frac{U_{1m}^{rec}}{\sqrt{2}} = 231,83$ В. Эта величина отличается от полученной по формуле (1) на 4,5 %, что связано с влиянием высших гармоник в выходном напряжении. Амплитуда пятой гармоники, определяемая формулой $U_{5m}^{rec} = b_5 = \frac{3}{5\pi} U_m^{rec}$, составот амплитуды первой гармоники. Седьмая гармоника 20 % ляет $U_{7m}^{rec} = b_7 = \frac{3}{7\pi} U_m^{rec}$ имеет амплитуду 14,29 % от первой. Амплитуда одиннадцатой

гармоники равна $U_{11m}^{rec} = b_{11}^{rec} = \frac{3}{11\pi} U_m^{rec}$, при этом $\frac{U_{11m}^{rec}}{U_{1m}^{rec}} \times 100\% = 9,09\%$. Эти пока-

затели не отвечают требованиям ГОСТ 32144-2013, определяющего нормы качества электроэнергии в системах электроснабжения общего назначения [5]. Действительно, в соответствии с этим стандартом амплитуда пятой гармоники должна быть меньше 6 %, а седьмой гармоники – меньше 5 % амплитуды основной гармоники. И, наверное, это является основной причиной перехода в частотных преобразователях к синусоидальной и векторной широтно-импульсной модуляции, которые требуют вычисления синусов и произведения операций умножения на каждом такте ШИМ.

Однако достичь качества выходного напряжения, соответствующего ГОСТ 32144-2013, можно в частотных преобразователях [6], формирующих трапецеидальное фазное напряжение (рис. 3).



Рис. 3. Трапецеидальное фазное напряжение на выходе частотного преобразователя

Определим действующее, то есть среднеквадратичное, значение напряжения, представленного на рис. 3:

$$U_{rms}^{tr} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \left[\int_{0}^{\frac{\pi}{3}} \left(\frac{3U_{m}^{tr}}{\pi} \theta \right)^{2} d\theta + \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}} \left(U_{m}^{tr} \right)^{2} d\theta + \int_{\frac{2\pi}{3}}^{\pi} \left\{ U_{m} \left[1 - \frac{3\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right)}{\pi} \right] \right\}^{2} d\theta \right] = \frac{1}{\pi} \left[\frac{3\left(U_{m}^{tr}\right)^{2} \theta^{3}}{\pi^{2}} \right]_{0}^{\frac{\pi}{3}} + \left(U_{m}^{tr}\right)^{2} \theta \left| \frac{2\pi}{3} + 9\left(U_{m}^{tr}\right)^{2} \theta \right|_{\frac{2\pi}{3}}^{\frac{\pi}{3}} - \frac{9\left(U_{m}^{tr}\right)^{2} \theta^{2}}{\pi} \theta \left| \frac{2\pi}{3} + \frac{3\left(U_{m}^{tr}\right)^{2} \theta^{3}}{\pi^{2}} \theta \right|_{\frac{2\pi}{3}}^{\frac{\pi}{3}} + \frac{9\left(U_{m}^{tr}\right)^{2} \theta}{\pi^{2}} \theta \left| \frac{2\pi}{3} - \frac{9\left(U_{m}^{tr}\right)^{2} \theta^{2}}{\pi} \theta \right|_{\frac{2\pi}{3}}^{\frac{\pi}{3}} - \frac{9\left(U_{m}^{tr}\right)^{2} \theta^{2}}{\pi^{2}} \theta \left| \frac{2\pi}{3} - \frac{9\left(U_{m}^{tr}\right)^{2} \theta^{2}}{\pi^{2}} \theta \right|_{\frac{2\pi}{3}}^{\frac{\pi}{3}} + \frac{3\left(U_{m}^{tr}\right)^{2} \theta^{3}}{\pi^{2}} \theta \left| \frac{2\pi}{3} - \frac{9\left(U_{m}^{tr}\right)^{2} \theta^{2}}{\pi^{2}} \theta \right|_{\frac{2\pi}{3}}^{\frac{\pi}{3}} + \frac{3\left(U_{m}^{tr}\right)^{2} \theta^{3}}{\pi^{2}} \theta \left| \frac{2\pi}{3} - \frac{9\left(U_{m}^{tr}\right)^{2} \theta^{2}}{\pi^{2}} \theta \right|_{\frac{2\pi}{3}}^{\frac{\pi}{3}} + \frac{9\left(U_{m}^{tr}\right)^{2} \theta^{2}}{\pi^{2}} \theta \left| \frac{2\pi}{3} - \frac{9\left(U_{m}^{tr}\right)^{2} \theta^{2}}{\pi^{2}} \theta \right|_{\frac{2\pi}{3}}^{\frac{\pi}{3}} + \frac{9\left(U_{m}^{tr}\right)^{2} \theta^{2}}{\pi^{2}} \theta \left| \frac{2\pi}{3} - \frac{9\left(U_{m}^{tr}\right)^{2} \theta^{2}}{\pi^{2}} \theta \right|_{\frac{2\pi}{3}}^{\frac{\pi}{3}} + \frac{9\left(U_{m}^{tr}\right)^{2} \theta^{2}}{\pi^{2}} \theta \left| \frac{2\pi}{3} - \frac{9\left(U_{m}^{tr}\right)^{2} \theta^{2}}{\pi^{2}} \theta \right|_{\frac{2\pi}{3}}^{\frac{\pi}{3}} + \frac{9\left(U_{m}^{tr}\right)^{2} \theta^{2}}{\pi^{2}} \theta \left| \frac{2\pi}{3} - \frac{9\left(U_{m}^{tr}\right)^{2} \theta^{2}}{\pi^{2}} \theta \right|_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{\pi}{3}} + \frac{9\left(U_{m}^{tr}\right)^{2} \theta^{2}}{\pi^{2}} \theta \left| \frac{2\pi}{3} - \frac{9\left(U_{m}^{tr}\right)^{2} \theta^{2}}{\pi^{2}} \theta \right|_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{\pi}{3}} + \frac{9\left(U_{m}^{tr}\right)^{2} \theta^{2}}{\pi^{2}} \theta \left| \frac{2\pi}{3} - \frac{9\left(U_{m}^{tr}\right)^{2} \theta^{2}}{\pi^{2}} \theta \right|_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{\pi}{3}} \theta \left| \frac{1}{\pi^{2}} \theta^{2} \theta^{2}} \theta \right|_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{\pi}{3}} \theta^{2} \theta^{2}} \theta \left| \frac{1}{\pi^{2}} \theta^{2} \theta^{2} \theta^{2}} \theta \right|_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{\pi}{3}} \theta^{2} \theta^{2}} \theta \right|_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{\pi}{3}} \theta^{2} \theta^{2}} \theta^{2} \theta^{2}} \theta^{2} \theta^{2} \theta^{2} \theta^{2}} \theta^{2} \theta^{2}} \theta^{2} \theta^{2} \theta^{2} \theta^{2} \theta^{2}} \theta^{2} \theta^{2} \theta^{2} \theta^{2} \theta^{2}} \theta^{2} \theta^{2} \theta^{2}} \theta^{2} \theta^{2} \theta^{2}} \theta^{2} \theta^{2} \theta^{2}} \theta^{2} \theta^{2} \theta^{2} \theta^{2}} \theta^{2} \theta^{2} \theta^{2} \theta^{2}} \theta^{2} \theta^{2} \theta^{2} \theta^{2}} \theta^{2} \theta^$$

где $U_m^{\prime\prime}$ – амплитуда трапецеидального напряжения.

После несложных преобразований в (5) получим

$$U_{rms}^{tr} = \frac{\sqrt{5}}{3} U_m^{tr}.$$

Поскольку максимальная величина $U_m^{tr} = \frac{U_d}{2}$, то при подключении частотного преобразователя к трехфазной сети с линейным напряжением 380 В максимальное действующее значение фазного напряжения составит $U_{mns}^{tr} = 191,93$ В. Этот показатель меньше, чем в инверторах с π -коммутацией транзисторов, но больше, чем в частотных преобразователях с синусоидальной модуляцией [2, 3].

С другой стороны, исследования [7] показывают, что гармонический состав выходного напряжения инвертора с трапецеидальной формой фазного напряжения будет определяться коэффициентами ряда Фурье:

$$b_{2l+1} = 0, \ npu \ r = 0;$$

$$b_{2l+1} = (-1)^{r-1} \frac{6\sqrt{3}}{(2l+1)^2 \pi^2} U_m^{tr}, \ npu \ r = 1 \ u \ r = 2.$$
(6)

Формулы (6) позволяют сделать вывод, что в таких частотных преобразователях качество выходного напряжения соответствует требованиям ГОСТ 32144-2013. Действительно, амплитуда первой гармоники определяется формулой $b_1 = \frac{6\sqrt{3}}{\pi^2} U_m^{\prime\prime}$. В то же время амплитуда пятой гармоники равна $b_5 = -\frac{6\sqrt{3}}{25\pi^2} U_m^{\prime\prime}$, что составит 4 % от амплитуды первой гармоники. Амплитуда седьмой гармоники определяется выражением $b_7 = \frac{6\sqrt{3}}{49\pi^2} U_m^{\prime\prime}$, следовательно, она равна 2,23 % от амплитуды основной гармоники. Гармоники с более высокими номерами имеют еще менее значимые относительные амплитуды, причем гармоники с номерами, кратными трем, и четные гармоники отсутствуют в выходном сигнале частотного преобразователя, формирующего трапецеидальное фазное напряжение. Кроме того, необходимо обратить внимание на то, что в зависимости от величины rменяется знак коэффициента высших гармоник. Однако следует отметить, что анализ гармонического состава выходного напряжения частотных преобразователей с π -коммутацией транзисторов и трапецеидальной модуляцией выполнен без учета процессов широтно-импульсной модуляции. Очевидно, что коммутация силовых транзисторов внесет свой вклад в амплитуды высших гармоник, но оценка такого влияния является предметом отдельного научного исследования, не входящего в рамки настоящей статьи.

Следует обратить внимание на достоинства частотных преобразователей, формирующих выходное трапецеидальное фазное напряжение. Отличительной особенностью таких инверторов является отсутствие необходимости введения «мертвого» времени при переключении транзисторов одного полумоста. Кроме того, модулятор, формирующий трапецеидальное напряжение, представляет собой простую логическую схему, не требующую каких-либо вычислительных процедур. Следовательно, его применение снижает требования к тактовой частоте и сложности микроконтроллера, предназначенного для технической реализации частотного преобразователя. Следует также отметить, что в инверторах, формирующих трапецеидальное фазное напряжение, на каждом периоде широтно-импульсной модуляции переключаются всего три транзистора, что позволяет снизить коммутационные потери по сравнению с инверторами с синусоидальной и векторной модуляцией.

Выводы

1. Проведенный анализ позволяет сделать вывод, что частотные преобразователи с трапецеидальным законом коммутации силовых транзисторов обладают качеством выходного напряжения, соответствующим ГОСТ 32144-2013.

2. Такие инверторы отличаются простотой технической реализации и низкими требованиями к вычислительной мощности контроллера, предназначенного для их технической реализации.

3. Частотные преобразователи, формирующие трапецеидальное фазное напряжение, отличаются малыми коммутационными потерями в силовых транзисторах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. *Михайлов О.П.* Автоматизированный электропривод станков и промышленных роботов. М.: Машиностроение, 1990. 304 с.
- Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. М.: Академия, 2006. – 265 с.
- 3. Патент России № 2216850, МПК Н03К7/08. Цифровой модулятор для преобразователя частоты асинхронного электродвигателя / А.В. Стариков, В.А. Стариков (Россия) // Опубл. 20.11.2003, Бюл. № 32.
- 4. Патент России № 2844070, МПК Н03К7/08. Цифровой модулятор для преобразования частоты / С.Л. Лисин, Д.Ю. Рокало, А.В. Стариков (Россия) // Опубл. 07.02.2018, Бюл. № 4.
- 5. *Анучин А.С.* Системы управления электроприводов. М.: Издательский дом МЭИ, 2015. 373 с.
- 6. Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике. М.: Физматгиз, 1961. 783 с.
- ГОСТ 32144-2013. Нормы качества электроэнергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2014. – 16 с.
- 8. Стариков А.В., Кузнецов В.В., Рокало Д.Ю. Анализ гармонического состава трапецеидального фазного напряжения, формируемого частотным преобразователем // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. 2017. № 3 (55). С. 75–79.

Статья поступила в редакцию 15 февраля 2018 г.

THE ANALYSIS OF OUTPUT VOLTAGE QUALITY OF FREQUENCY CONVERTERS WITH THE SIMPLE LAWS OF POWER TRANSISTORS SWITCHING

A.V. Starikov, S.L. Lisin, D.Yu. Rokalo

Samara State Technical University 244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

Abstract. Output phase voltage of frequency converters with π -switching of transistors and trapezoidal modulation are considered. Analytic expressions for determining of effective values of voltage for both cases are found. Formulas for calculation of the amplitudes of the fundamental and higher harmonics of the phase voltage of the considered frequency converters are obtained. It is shown that the output voltage of the inverter with π - switching of the transistors does not conform to requirements to the power quality standards. The harmonic composition of the output signal of the frequency converter, which forms a trapezoidal phase voltage, is analyzed. It is concluded that without taking into account the pulse-width modulation process, such an inverter has small amplitudes of higher harmonics and corresponds to the requirements of the State Standard. It is noted that the frequency converter that forms the trapezoidal phase voltage is characterized by the simplicity of technical implementation and small switching losses in power transistors.

Keywords: frequency converter; phase voltage; harmonic composition; power transistor; switching losses.

Alexander V. Starikov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor. Sergey L. Lisin (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor. Daniil Yu. Rokalo, Postgraduate Student.

УДК 621.365.5

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ ПЛОСКОГО ДИЭЛЕКТРИКА В СВЧ-КАМЕРЕ ЛУЧЕВОГО ТИПА

С.В. Тригорлый, В.С. Алексеев, В.В. Захаров, С.Г. Калганова

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А. Россия, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77

Аннотация. Приведены результаты численного моделирования процесса мягкой CBЧ-сушки капиллярно-пористого материала в CBЧ-камере лучевого типа с применением рупорной антенны. Предложена математическая модель процесса CBЧсушки диэлектрика, основанная на взаимосвязанных уравнениях электродинамики и тепломассопереноса. Математическое моделирование осуществлялось с использованием метода конечных элементов, реализованного в программном обеспечении COMSOL Multiphysics. Модель учитывает изменение диэлектрической проницаемости и коэффициента потерь диэлектрика в процессе сушки в зависимости от его влагосодержания.

Ключевые слова: сушка, СВЧ-нагрев, диэлектрик, капиллярно-пористое тело, численное моделирование.

На сегодняшний день технологии СВЧ-термообработки диэлектриков имеют весьма широкие области применения: нагрев, пастеризация и стерилизация, вулканизация, полимеризация, дефростация, спекание, плавление, разрушение диэлектриков [1]. Одной из традиционных областей применения СВЧэлектротехнологии является сушка влажных диэлектриков. Области применения СВЧ-сушки весьма обширны. СВЧ-сушка применяется в сельском хозяйстве [2], в пищевой промышленности [3], при производстве керамики [4], в деревообрабатывающей промышленности [5], в полиграфической промышленности [6] и др.

Повышенный интерес к применению CBЧ-технологии для сушки диэлектриков обусловлен ее преимуществами перед традиционными видами нагрева (конвективным и кондуктивным): CB-нагрев за счет объемного тепловыделения в диэлектрике обеспечивает перемещение влаги из внутренних слоев диэлектрика к наружной поверхности; нагреву подвергаются наиболее увлажненные области диэлектрика; безынерционность процесса обеспечивает высокую точность регулирования.

В процессе сушки повышенные градиенты температуры и давления в объеме диэлектрика могут приводить к нежелательным термомеханическим явлениям, таким как коробление, растрескивание. В случаях, когда по техническим услови-

Тригорлый Сергей Викторович (к.т.н.), доцент кафедры «Электроснабжение и электротехнология».

Алексеев Вадим Сергеевич (к.т.н.), заместитель заведующего кафедрой «Электроснабжение и электротехнология».

Захаров Вадим Валерьевич, аспирант кафедры «Электроснабжение и электротехнология».

Калганова Светлана Геннадьевна (д.т.н.), заведующий кафедрой «Электроснабжение и электротехнология».

ям указанные явления недопустимы, применяются мягкие режимы сушки при температуре ниже 100 °C.

Перспективным направлением развития СВЧ-установок для сушки диэлектриков является разработка СВЧ-установок с камерами лучевого типа с использованием, например, рупорных антенн [1].

Целью данной работы является численное моделирование процесса мягкой СВЧ-сушки плоского влажного диэлектрика в СВЧ-камере лучевого типа с применением рупорной антенны. Основной задачей является моделирование распределений электрического, температурного поля и поля влагосодержания с учетом изменения диэлектрической проницаемости и коэффициента потерь диэлектрика в процессе сушки в зависимости от его влагосодержания. Кроме того, необходима оценка влияния частоты СВЧ-генератора на распределения температуры и влагосодержания.

На рис. 1 схематично показана геометрическая модель камеры лучевого типа в виде рупорной антенны и плоского диэлектрика – асбоцементной плиты толщиной 0,2 м. Физические свойства материала диэлектрика и исходные расчетные параметры СВЧ-установки приведены в таблице.



Рис. 1. Геометрическая модель задачи

Для описания процесса СВЧ-сушки использована модель конвекционной сушки капиллярно-пористого тела [7], которая дополнена уравнением, описывающим распространение и поглощение электромагнитной волны в диэлектрике с соответствующими начальными и граничными условиями. В результате задача мягкой СВЧ-сушки диэлектрика описывается следующей системой дифференциальных уравнений электродинамики и тепломассопереноса:

$$\nabla \times (\mu_r^{-1} \nabla \times \mathbf{E}) - k_0^2 \bigg(\varepsilon'_{r,eff} - \frac{j\sigma}{\omega \varepsilon_0} \bigg) \mathbf{E} = 0; \qquad (1)$$

$$c_p \rho_0 \frac{\partial T}{\partial \tau} = \nabla \left(\lambda \nabla T \right) + \frac{\varepsilon r_0}{c_m} \frac{\partial U}{\partial \tau} + q_v; \qquad (2)$$

$$\left(1-\varepsilon\right)\frac{\partial U}{\partial \tau} = \nabla \left(a_d \delta \nabla T + a_d \nabla U\right),\tag{3}$$

где μ_r – относительная магнитная проницаемость;

Е – вектор напряженности электрического поля;

 $k_0 = \omega \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}$ – волновое число;

 $\varepsilon'_{r,eff}$ – эффективная относительная диэлектрическая проницаемость (действительная часть);

 $\sigma = \omega \varepsilon_0 \varepsilon''_{r,eff}$ – электрическая проводимость;

 $\omega = 2\pi f$ – угловая частота;

 ε_0 – электрическая постоянная;

 $\varepsilon''_{r,eff}$ – эффективный коэффициент потерь (мнимая часть диэлектрической проницаемости):

f – частота электромагнитного поля;

*с*_{*p*} – удельная теплоемкость;

 ρ_0 – плотность;

T – температура;

 τ – время;

λ – коэффициент теплопроводности;

ε – критерий фазового перехода;

*г*₀ – удельная теплота парообразования;

U – влагосодержание;

*q*_v – мощность внутренних источников теплоты;

*a*_d – коэффициент диффузии влаги;

 δ – относительный коэффициент термодиффузии.

Уравнение (1) представляет собой волновую форму уравнений Максвелла для вектора напряженности электрического поля Е – уравнение Гельмгольца [8].

Уравнения (2), (3) используются для описания процесса тепломассопереноса во влажном капиллярно-пористом теле и представляют собой уравнения Лыкова – Михайлова [9].

Связь задач электродинамики и тепломассопереноса осуществляется через соотношение, получаемое из теоремы Пойнтинга:

$$q_{\nu} = 0.5\omega\varepsilon_{0}\varepsilon_{r}^{\prime\prime} \cdot \left|\mathbf{E}\right|^{2}.$$
(4)

Для задания диэлектрической проницаемости $\varepsilon'_{r,eff}$ и коэффициента потерь $\varepsilon''_{r,eff}$ с учетом зависимости указанных свойств от влагосодержания U используется модель эффективных электрофизических свойств [10]:

$$\varepsilon_{r,eff} = U \cdot \frac{\rho_l}{\rho_s} \cdot \varepsilon_r^l + (1 - U \cdot \frac{\rho_l}{\rho_s}) \cdot \varepsilon_r^s,$$
(5)

где ρ_s, ρ_l – плотность сухого диэлектрика и воды соответственно;

 $\varepsilon_r^s, \varepsilon_r^l$ – диэлектрическая проницаемость / коэффициент потерь сухого диэлектрика и воды соответственно.

Задача электродинамики решается для двух расчетных областей: воздух

и диэлектрик, при этом граничные условия задаются следующим образом.

Ввод СВЧ-энергии (распределение напряженности поля E_{in}) через торец прямоугольного волновода с размерами широкой и узкой стенки a и b задается выражением

$$E_{in} = 4Z_{TE} \, \frac{p_{in}}{ab} \cos \frac{\pi x}{a} \,, \tag{6}$$

где Z_{TE} – волновое сопротивление распространению электромагнитной волны TE_{10} при ее прохождении через прямоугольный волновод;

*p*_{in} – вводимая СВЧ-мощность;

х – координата вдоль широкой стенки волновода.

На внешних поверхностях расчетной области (см. рис. 1) задается условие отражения электромагнитной волны:

$$\mathbf{n} \times \mathbf{E} = 0, \tag{7}$$

где n – единичный вектор нормали к поверхности.

На границе воздух – диэлектрик имеют место условия сопряжения полей:

$$[\mathbf{H}_{2} - \mathbf{H}_{1}, \mathbf{n}] = 0, \ [\mathbf{n}, \mathbf{E}_{2} - \mathbf{E}_{1}] = 0, \ \mathbf{n}(\mathbf{D}_{2} - \mathbf{D}_{1}) = 0, \ \mathbf{n}(\mathbf{B}_{2} - \mathbf{B}_{1}) = 0,$$
(8)

где H₂, H₁, E₂, E₁ – векторы напряженности магнитного и электрического поля;

D₂, D₁, B₂, B₁ – векторы электрической и магнитной индукции для сред 2 и 1 соответственно;

n – единичный вектор нормали к поверхности, направленный из среды 1 в среду 2.

Начальные условия задачи электродинамики:

$$E(0) = 0.$$
 (9)

Задача тепломассопереноса решается только для области диэлектрика, при этом граничные условия задаются следующим образом. На нижней и боковых границах расчетной области задаются условия отсутствия тепло- и массообмена:

$$\frac{\partial U}{\partial \mathbf{n}} = 0; \ \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} = 0, \tag{10}$$

где n – единичный вектор нормали к поверхности.

На поверхности тепло- и массообмена задаются граничные условия:

$$-\lambda \nabla T + h_m (T_c - T) - (1 - \varepsilon) r_0 \alpha_m \rho_0 (U - U_r) = 0;$$

$$a_d \delta \nabla T + a_d \nabla U + \alpha_m (U - U_r) = 0,$$
(11)

где h_m – коэффициент теплоотдачи с поверхности;

*Т*_{*c*} – температура окружающей среды;

α_m – коэффициент массоотдачи;

U_r – влагосодержание окружающей среды.

Начальные условия задачи тепломассопереноса:

$$T(0) = T_0; \ U(0) = U_0, \tag{12}$$

где T_0 – начальная температура тела; U_0 – начальное влагосодержание тела. Исходные данные для моделирования приведены в таблице.

Параметр	Значение	Параметр	Значение
c_p , Дж/(кг·К)	960	T_0 , К	293,15
$ ho_s$, кг/м 3	1700	U_0 , кг/кг	0,5
$ ho_l$, кг/м 3	1000	${U}_r$, кг/кг	0,39
λ, Вт/(м·К)	1,76	f, ГГц	2,45, 0,915
3	0,7	μ_r	1
<i>r</i> ₀ , Дж/кг	$2,26 \cdot 10^{6}$	ε'_r^s	7
a_d , м 2 /с	2,3.10-8	ε''_r^s	1,4
h_m , Вт/(м ² ·К)	10	ε'_r^l	70
$lpha_m$, м/с	0,05	ε_r^l	15
T_c, K	293,15	<i>р_{іп}</i> , Вт	300

Исходные данные для моделирования



Рис. 2. Результаты моделирования (на частоте 2450 МГц): *а* – напряженность электрического поля, В/м; *б* – изотермы, °С; *в* – линии одинакового влагосодержания, кг/кг

В качестве инструмента для моделирования выбрано программное обеспечение COMSOL Multiphysics, позволяющее решать мультидисциплинарные технические задачи, описываемые дифференциальными уравнениями с применением метода конечных элементов. Для численного моделирования использован специальный прикладной режим программного обеспечения COMSOL Multiphysics – Coefficient form PDE. Данный режим позволяет в коэффициентной форме задавать пользовательские дифференциальные уравнения и их системы.

Моделирование проводилось для частоты СВЧ-генератора 2450 МГц и 915 МГц при соответствующих размерах рупорной антенны. Результаты моделирования представлены на рис. 2–5.



Рис. 3. Результаты моделирования (на частоте 2450 МГц): *a* – изменение влагосодержания во времени; δ – изменение температуры во времени



Рис. 4. Результаты моделирования (на частоте 915 МГц): *а* – изменение влагосодержания во времени; *б* – изменение температуры во времени

На рис. 2 приведены распределения напряженности электрического поля, температурного поля и поля влагосодержания для момента времени сушки $\tau = 24$ ч при СВЧ-нагреве на частоте 2450 МГц. Из рис. 2 прослеживается качественное совпадение формы изолиний электрического поля (см. рис. 2*a*) и поля 140

влагосодержания (см. рис. 2*в*). Температурный максимум находится на оси симметрии рупорной антенны на глубине около 1 см от наружной поверхности асбоцементной плиты (см. рис. 2*б*).

На рис. 3 приведены графики изменения влагосодержания и температуры во времени при СВЧ-нагреве на частоте 2450 МГц, на основании которых можно сделать вывод о значительной неравномерности влагосодержания между поверхностью (x = 0,225 м, y = 0 м) и центром (x = 0,225 м, y = -0,1 м) диэлектрика в процессе сушки (от 17 до 21 %). Неравномерность температуры при этом составляет около 32 %.

На рис. 4 приведены графики изменения влагосодержания и температуры во времени при СВЧ-сушке на частоте 915 МГц. При СВЧ-сушке на частоте 915 МГц неравномерность влагосодержания между поверхностью и центром диэлектрика не превышает 2,9 % (см. рис. 4). Неравномерность температуры не превышает 3,3 %.



Рис. 5. Результаты моделирования распределения напряженности электрического поля: *a* – на частоте 2450 МГц; *б* – на частоте 915 МГц

Максимальная температура нагрева диэлектрика через 24 ч сушки составляет: на частоте 915 МГц – 59 °С, на частоте 2450 МГц – 98 °С. Скорость сушки всего объема диэлектрика на частоте 915 МГц выше, чем на частоте 2450 МГц (см. рис. 3a и 4a).

Полученные результаты объясняются тем, что на частоте 915 МГц глубина проникновения электромагнитной волны в диэлектрик больше, чем на частоте 2450 МГц. На частоте 915 МГц режим сушки более «мягкий», что снижает вероятность возникновения термомеханических явлений.

На рис. 5 приведены распределения напряженности электрического поля по толщине диэлектрика при сушке на частотах 2450 и 915 МГц для моментов времени, соответствующих началу ($\tau = 0$ ч) и окончанию ($\tau = 24$ ч) сушки. Из рис. 5 видно изменение напряженности электрического поля в процессе сушки, что связано с тем, что в модели учитывается изменение диэлектрической проницаемости и коэффициента потерь в зависимости от влагосодержания, изменяющегося в процессе сушки. Напряженность электрического поля с учетом влияния указанных факторов изменяется в пределах 0–10 %.

В результате моделирования установлено влияние учета изменения диэлектрической проницаемости и коэффициента потерь в зависимости от влагосодержания диэлектрика на распределение полей температуры и влагосодержания в процессе СВЧ-сушки. Расхождение результатов моделирования с учетом и без учета указанных зависимостей составляет: для поля температуры – 2,5–14,3 %, для поля влагосодержания – 0,25–1,3 %.

На частоте 2450 МГц отражающая стенка в нижней части диэлектрика (y = -0,2 м) не приводит к отражению электромагнитной волны ввиду малой глубины ее проникновения. На частоте 915 МГц данные отражения присутствуют и оказывают незначительное влияние на поле температуры и влагосодержания.

По результатам данной работы можно сделать следующие выводы.

1. Предложенная математическая модель мягкой СВЧ-сушки капиллярнопористого диэлектрика адекватно описывает происходящие в процессе термообработки процессы. Результаты моделирования качественно соответствуют известным представлениям о процессах тепло- и массопереноса, происходящих при сушке капиллярно-пористых диэлектриков в поле СВЧ.

2. Установлено влияние изменения диэлектрической проницаемости и коэффициента потерь в функции влагосодержания на напряженность электрического поля, температуру и влагосодержание.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. Архангельский Ю.С. СВЧ-электротермия. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 1998. 408 с.
- Комаров В.И., Молохов М.Н., Садковская О.Д. и др. Сушка сельскохозяйственных продуктов в промышленных СВЧ-установках // Применение СВЧ-энергии в технологических процессах и научных исследованиях: тез. докл. Всесоюз. VI науч.- практ. конф. 11-13 июня 1991. – Саратов: Сарат. политехн. ин-т, 1991. – С. 25–26.
- Иванов А.С., Иванов В.А., Сапунов Г.С., Янкевич В.Б. Исследование процесса обезвоживания пищевых продуктов в микроволновых вакуумных установках // Актуальные проблемы электронного приборостроения: материалы междунар. науч.- техн. конф. 7–9 сентября 1998. – Саратов: Сарат гос. техн. ун-т, 1999. – Ч. III. – С. 135–138.
- 4. Микроволновая технология сушки керамических материалов / А.А. Крупа, М.Е. Ильченко, В.А. Михайленко, В.А. Макогон // Стекло и керамика. 1993. № 1. С. 21–23.
- Бомбин А.М., Гутман А.Л., Лисицын В.И., Саушкин В.В. Сушка пиломатериалов больших размеров в поле сверхвысокой частоты // Соврем. пробл. технологии деревообрабат. промышленности: тез. докл. науч. конф., посвящ. 35-летию фак. «Технол. деревообраб.». – Воронеж: Гос. лесотехн. акад., 1995. – С. 29–30.
- 6. Байбурин В.Б., Максименко Б.Н., Терентьев А.А. и др. СВЧ-резонатор для сушки бумаги // Актуальные проблемы электронного приборостроения: материалы междунар. науч.- техн. конф. 10–12 сентября 1996. Саратов: Сарат гос. техн. ун-т, 1996. Ч. 2. С. 59–60.
- 7. Алексеев В.С. Применение программного комплекса COMSOL Multiphysics для моделирования процесса сушки влажных капиллярно-пористых материалов // Вопросы электротехнологии. 2015. № 1/2015. С. 10–15.
- 8. Вайнштейн Л.А. Электромагнитные волны. М.: Радио и связь, 1988. 440 с.
- 9. Лыков А.В. Тепломассообмен: справочник. М.: Энергия, 1978. 480 с.
- 10. Электротехнические материалы: Учебник для вузов / Н.П. Богородицкий, В.В. Пасынков, Б.М. Тареев. 7-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1985. 304 с.

Статья поступила в редакцию 10 февраля 2018 г.

NUMERICAL MODELING OF THE PLANE DIELECTRIC DRYING PROCESS IN THE RAY TYPE MICROWAVE CHAMBER

S.V. Trigorly, V.S. Alekseev, V.V. Zakharov, S.G. Kalganova

Yuri Gagarin Saratov State Technical University 77, Politechnicheskaya st., Saratov, Russian Federation

Abstract. The results of numerical modeling of the process of soft microwave drying of capillary-porous material in a ray type microwave chamber with the use of a horn antenna are presented. A mathematical model of the microwave drying process of a dielectric based on coupled equations of electrodynamics and heat and mass transfer is proposed. Mathematical modeling was carried out using the finite element method implemented in the COMSOL Multiphysics software. The model takes into account the change in dielectric permittivity and dielectric loss factor in the drying process, depending on its moisture content.

Keywords: drying, microwave heating, dielectric, capillary-porous material, numerical simulation.

Sergey V. Trigorly (Ph. D.(Techn.)), Associate professor.

Vadim S. Alekseev (Ph. D.(Techn.)), Associate professor, Deputy Head: Department of Electricity Supply and Electrotechnics.

Vadim V. Zakharov, Postgraduate.

Svetlana G. Kalganova (Dr. Sc.(Techn.)), Professor, Head: Department of Electricity Supply and Electrotechnics.

УДК 621.311

ОПТИМИЗАЦИЯ ДОЛГОСРОЧНЫХ РЕЖИМОВ ГЭС АНГАРО-ЕНИСЕЙСКОГО КАСКАДА

С.С. Труфакин¹, В.И. Пантелеев², Е.А. Совбан³, А.Г. Русина⁴

¹Филиал АО «СО ЕЭС» Красноярское РДУ Россия, 660020, г. Красноярск, ул. Петра Подзолкова, Зг

²ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» Россия, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79

³Филиал АО «СО ЕЭС» ОДУ Сибири Россия, 650991, г. Кемерово, ул. Кузбасская, 29

⁴ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет» Россия, 630073, г. Новосибирск, пр-т К.Маркса, 20

Аннотация. Структура установленной мощности ОЭС Сибири характеризуется значительной долей мощностей гидроэлектростанций. В связи с высоким влиянием режимов гидроэлектростанций на эффективность работы объединенной энергосистемы при планировании требуется учитывать все технические и экономические особенности ее работы. Актуальной является задача повышения эффективности планирования режимов работы гидроэлектростанций как для обеспечения надежности функционирования объединенной энергосистемы, так и для минимизации суммарной стоимости электроэнергии. С точки зрения повышения эффективности деловых процессов актуальной также является задача автоматизации водноэнергетических расчетов. Применение оптимизационных методов позволит более эффективно решать эти задачи.

Ключевые слова: гидроэлектростанция, каскад гидростанций, планирование режимов работы ГЭС, оптимизация режимов ГЭС.

В настоящее время процессы долгосрочного планирования электроэнергетического режима и согласования графика ремонтов сетевого оборудования в энергосистемах с большой долей гидроэлектростанций (ГЭС) являются трудоемкой задачей в связи с отсутствием единого средства, объединяющего возможности расчета как электрического, так и водно-энергетического режима. Такие расчеты осуществляются в несколько итераций с привлечением специалистов разных направлений. Для определения возможности реализации того или иного ремонта сначала рассчитывают, как правило, три варианта режима работы ГЭС (различная водность года), после чего накладывают ограничения по электрический сети, минимальные нагрузки тепловых станций с учетом статистики потребления на

Труфакин Сергей Сергеевич, главный специалист отдела балансов мощности, электроэнергии и статистики службы энергетических режимов и балансов.

Пантелеев Василий Иванович (д.т.н., проф.), директор политехнического института, заведующий кафедрой «Электротехнические комплексы и системы».

Совбан Екатерина Андреевна, специалист 1-й категории отдела оперативного планирования службы оперативного планирования режимов.

Русина Анастасия Георгиевна (д.т.н., доц.), профессор кафедры «Автоматизированные электроэнергетические системы».

выбранный период расчета. Результатом раздельного расчета могут явиться как сложно реализуемые ремонты сетевого оборудования, так и неоптимальные, с точки зрения максимальной выработки электроэнергии, режимы ГЭС.

Также наблюдается отсутствие единого подхода к определению энергетических показателей режимов работы ГЭС при подготовке информации для расчетов КОМ (расчет стоимости мощности для электростанций – субъектов оптового рынка) и балансов ФАС (расчет стоимости электроэнергии для населения, стоимости мощности электростанций, поставляемых мощность в вынужденном режиме, стоимости электроэнергии по двухсторонним договорам).

Для решения данных задач рассмотрим возможности оптимизационных моделей. Применение оптимизационных методов при расчете режимов ГЭС способствует определению более экономичных режимов энергосистемы и экономии труда и времени технологов по сравнению с ручным расчетом. Кроме того, оптимизационные модели позволяют вводить режим в допустимую область, что при многих зачастую противоречивых ограничениях является очень сложной и трудоемкой задачей. В рамках данной статьи рассмотрим математические модели ГЭС для оптимизационных расчетов. Опишем основные функциональные особенности методов оптимизации, выделив преимущества и недостатки, и дадим рекомендации по разработке программного обеспечения.

При рассмотрении особенностей структуры оптимизационных моделей ГЭС можно выделить два их основных типа:

 – «Оптимизация одиночной ГЭС» – применяется либо при наличии только одной ГЭС в энергосистеме, либо при «слабых» связях по водному режиму в каскаде;

 – «Совместная оптимизация каскада ГЭС» – когда режимы работы ГЭС в каскаде оказывают значительное влияние друг на друга.

При рассмотрении Ангаро-Енисейского каскада ГЭС определим структуру оптимизационной модели, основанную на степени регулирования водохранилища и особенностях каждой ГЭС.

Енисейский каскад: Саяно-Шушенская ГЭС, Майнская ГЭС, Красноярская ГЭС – оптимизационные модели одиночных ГЭС для каждой электростанции каскада. Выбор обуславливается большим отличием в напорах (удельных расходах) представленных ГЭС. Саяно-Шушенская ГЭС с расчетным напором 194 м значительно превышает напоры Красноярской ГЭС – 93 м, Майнской ГЭС – 16,7 м, т. е. удельный прирост выработки электроэнергии на Саяно-Шушенской ГЭС гораздо выше остальных и соответственно увеличение ее выработки электроэнергии будет всегда значительно выше уменьшения выработки электроэнергии на остальных ГЭС за счет изменения расхода на Саяно-Шушенской ГЭС.

Ангарский каскад: Иркутская ГЭС – оптимизационная модель одиночной ГЭС; Братская ГЭС, Усть-Илимская ГЭС, Богучанская ГЭС – оптимизационная модель каскада, так как Усть-Илимская и Богучанская ГЭС имеют водохранилища малого объема и работают в режиме пропуска расходов Братской ГЭС, поэтому ограничения, накладываемые на режимы БоГЭС и УИГЭС, транслируются и на режим БрГЭС.

Рассмотрим два метода оптимизации: градиентный метод и метод динамического программирования.

Градиентный метод

Это довольно часто используемый метод оптимизации режимов энергетиче-

ских систем, основанный на расчете градиент-вектора и поиске оптимального значения с использованием фиксированного или оптимального шага поиска. Опишем градиент-вектор оптимизационной модели каскада ГЭС:

$$\nabla E = \frac{\partial E}{dY} \,,$$

где E – интегральная выработка ГЭС; Y – вектор независимых переменных (подбираемые в ходе оптимизации параметры – расходы $Q_{i,j}$, в которой i – номер расчетного интервала, j – номер электростанции или водохранилища в каскаде).

Распишем частную производную:

$$\frac{\partial E}{\partial Q_{i,j}} = \frac{\partial E_{i,j}}{\partial Q_{i,j}} + \sum_{i=i+1}^{k-1} \frac{\partial E_{i,j}}{\partial Q_{i,j}} + \frac{\partial E_{k,j}}{\partial Q_{i,j}} + \sum_{i=i}^{k} \sum_{j=j+1}^{n} \frac{\partial E_{i,j}}{\partial Q_{i,j}}.$$
 (1)

Уравнение показывает, что если в интервале I изменить расход на ∂Q , то это вызовет изменение выработки этой ГЭС на ∂E . За счет изменения стока на этом интервале произойдет изменение отметок водохранилища и напора в последующих интервалах, изменение напора приведет к изменению выработки этой же ГЭС. В последнем балансирующем k-том интервале режим вынужденный, который будет также зависеть от ∂Q и режима в предыдущих интервалах. Также изменение ∂Q приведет к изменению отметок и напоров на нижележащих станциях, изменение напора приведет к изменение ∂Q приведет к изменению выработки других ГЭС.

Представим составляющие уравнения (1) производными, полученными дифференцированием явных функций:

$$\frac{\partial E_{i,j}}{\partial Q_{i,j}} = q_{i,j} + Q_{i,j} \frac{\partial q_{i,j}}{\partial H_{i,j}} \left(\frac{\partial Zvb_{i,j}}{2 \cdot \partial Q_{i,j}} - \frac{\partial Znb_{i,j}}{\partial Q_{i,j}} \right) \cdot T_{i,j} \cdot \frac{24}{1000};$$
(2)

$$\sum_{i=i+1}^{k-1} \frac{\partial E_{i,j}}{\partial Q_{i,j}} = \sum_{i=i+1}^{k-1} \left(Q_{i,j} \cdot \frac{\partial q_{i,j}}{\partial H_{i,j}} \frac{\partial Z v b_{i,j}}{\partial Q_{i,j}} \cdot T_{i,j} \cdot \frac{24}{1000} \right); \tag{3}$$

$$\frac{\partial E_{k,j}}{\partial Q_{i,j}} = q_{k,j} + Q_{k,j} \frac{\partial q_{k,j}}{\partial H_{k,j}} \left(\frac{\partial Z v b_{k,j}}{\partial Q_{k,j}} - \frac{\partial Z n b_{k,j}}{\partial Q_{k,j}} \right) \cdot T_{k,j} \cdot \frac{24}{1000}; \tag{4}$$

$$\sum_{i=i}^{k} \sum_{j=j+1}^{n} \frac{\partial E_{i,j}}{\partial Q_{i,j}} = \sum_{i=i}^{k} \sum_{j=j+1}^{n} \left(Q_{i,j} \frac{\partial q_{i,j}}{\partial H_{i,j}} \frac{\partial Zvb_{i,j}}{\partial Q_{i,j}} \cdot T_{i,j} \cdot \frac{24}{1000} \right), \tag{5}$$

где q – удельный расход; Q – расход; $\frac{\partial q}{\partial H}$ – производная, определяемая из характеристики удельного расхода; $\frac{\partial Zvb}{\partial Q}$ – производная, определяемая из объемной характеристики водохранилища; $\frac{\partial Znb}{\partial Q}$ – производная, определяемая из характеристики горизонтов и расходов; T – время интервала, сут.

Учет ограничений

В реальных расчетах режимов ГЭС специалистам приходится иметь дело со множеством различных ограничений как по водному режиму, так и по электрическому, поэтому формируется некоторая многомерная область допустимых значений. При многообразии ограничений и нелинейном характере влияния удобно применять метод проекции градиента, т. е. производится зигзагообразный обход границ допустимой области (рис. 1).



Рис. 1. Графическая интерпретация метода проекции градиента



Рис. 2. Структура алгоритма оптимизации (градиентный метод)

Основной задачей в проектировании точки X на поверхность ограничений является поиск такой новой точки X' на ограничениях, расстояние которой до точки X будем минимальным.

При проекции градиента необходимо понимать, каким образом будет достигнут поиск нового значения Х'. Для этого выделим несколько отличных друг от друга способов:

– «срезка» значений – уменьшение значения некоторых параметров до граничных значений. Такой способ применяется для ограничений по максимальной выдаче активной мощности или максимальному турбинному расходу, т. е. для ограничений, не влияющих на параметры последующих интервалов;

– градиентный спуск. Это, по сути, та же оптимизация, т. е. поиск нового значения Х' на основании того же градиента, только в обратном направлении.

На основании описанных основных компонентов алгоритма оптимизации, основанного на градиентном методе, представим обобщенную структуру алгоритма (рис. 2).

Преимуществами градиентного метода являются быстрота поиска оптимального значения, возможность внедрения в существующие программные комплексы без нарушения единой логики оптимизационных расчетов. Основными недостатками являются сложность математической модели и применение дополнительных способов ввода параметров в допустимую область.

Метод динамического программирования

Метод динамического программирования относится к методам нелинейного программирования. Его особенностью является возможность решения задач с дискретными переменными, многоэкстремальных задач и задач при разрывах функции. Сущность метода состоит в замене одной задачи со многими переменными множеством последовательно решаемых задач с существенно уменьшенным числом переменных. Оптимизация многошагового процесса осуществляется с использованием принципа оптимальности Белмана: «Оптимальное поведение обладает тем свойством, что каково бы ни было первоначальное состояние и первоначальное решение, последующее решение должно определять оптимальное поведение относительно состояния, полученного в результате первоначального решения».

Процесс динамического программирования можно вести от начала к концу и наоборот. В первом случае в процедуру решения вовлекаются последовательно все переменные, определяя при этом условно-оптимальные решения на каждом шаге, т. е. то управление, которое надо применить на j-том шаге, если (j-1) закончился определенным образом. После этого определяются уже не условные, а действительно оптимальные управления на каждом шаге при движении в обратном направлении (от конечного состояния).

Таким образом, в процессе оптимизации методом динамического программирования многошаговый процесс проходит дважды:

– первый раз в прямом направлении (прямой ход), в результате чего находятся условно-постоянные управления на каждом шаге;

– второй раз в обратном направлении, в результате чего находятся уже оптимальные управления на всех шагах (обратный ход).

Преимуществами метода динамического программирования являются простота и прозрачность математической модели, отсутствие возможности несходимости расчета, поиск безусловного оптимального значения (в зависимости от точности шага). Недостатком является большая длительность расчета прямого и обратного хода.

При реализации программного комплекса или его части по совместной оптимизации электрических и водно-энергетических длительных режимов энергосистем предлагается использовать следующий алгоритм программы.

Определяется оптимальный водно-энергетический режим ГЭС без ограничений по электрической сети (длительный процесс расчета, прямой и обратный ход).

Технолог определяет схему электрической сети или максимально допустимые перетоки в контролируемых сечениях, используя график ремонтов.

Оптимальный режим ГЭС, рассчитанный на первом этапе, вводится в допустимую область электрических режимов путем выбора наиболее близких к оптимальным показателей режима ГЭС из «матриц безусловной оптимизации».

На основании описанных основных компонентов алгоритма оптимизации, основанного на методе динамического программирования, представим обобщенную структуру алгоритма (рис. 3).



Рис. 3. Структура алгоритма оптимизации (динамическое программирование)

Особенностью представленного алгоритма является независимость первоначально рассчитанного оптимального режима («безусловная оптимизация») от ограничений по электрической сети. Но в расчетах с каскадом ГЭС эта независимость нарушается и приходится либо пересчитывать «матрицы безусловной оптимизации», либо разрабатывать подход, в котором сначала рассчитываются оптимальные режимы вышележащих ГЭС в каскаде, а после нижележащих.

Выводы

Рассмотрены основные методы реализации программных комплексов по оптимизации режимов энергосистем с ГЭС или отдельно водноэнергетических режимов ГЭС, описаны преимущества каждого.

Градиентный метод. Преимущества: быстрота поиска оптимального значения, возможность внедрения в существующие программные комплексы без нарушения единой логики оптимизационных расчетов. Недостатки: сложность математической модели и применение дополнительных способов ввода параметров в допустимую область.

Метод динамического программирования: Преимущества: простота и прозрачность математической модели, отсутствие возможности несходимости расчета, поиск безусловного оптимального значения (в зависимости от точности шага). Недостатки: большая длительность расчета.

Также для алгоритма, построенного на методе динамического программирования, выделена особенность, которая делает метод привлекательным для использования в задачах расчета длительных электроэнергетических режимов энергосистем с ГЭС. Заключается она в том, что после однократного расчета оптимального режима ГЭС без ограничений по электрической сети или с базовыми ограничениями последующие расчеты с ограничениями по электрической сети проходят гораздо быстрее путем выбора значений из уже готовых результатов оптимизации. Однако для применения алгоритма в модели каскада ГЭС необходимо прорабатывать подходы к поочередному расчету режимов ГЭС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. *Цветков Е.В., Алябышева Т.М., Парфенов Л.Г.* Оптимальные режимы гидроэлектростанций в энергетических системах. М.: Энергоатомиздат, 1984. 303 с.
- Филиппова Т.А., Мисриханов М.Ш., Сидоркин Ю.М., Русина А.Г. Гидроэнергетика. Изд. 3-е, перераб. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. – 620 с.
- 3. *Асарин А.Е., Бестужева К.Н.* Водноэнергетические расчеты. М.: Энергоатомиздат, 1986. 224 с.
- Русина А.Г., Совбан Е.А., Труфакин С.С. Задачи оптимального использования гидроэлектростанций в ЭЭС // З-я Междунар. науч.-техн. конф. «Электроэнергетика глазами молодежи», Екатеринбург, 2012. – С. 519–524.
- Труфакин С.С., Русина А.Г., Совбан Е.А. Разработка программного обеспечения «Водноэнергетический расчет ГЭС Ангаро-Енисейского каскада» // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – Казань, 2016. – № 9-10.– С. 105–111.

Статья поступила в редакцию 10 декабря 2017 г.

LONG-TERM HPP MODE OPTIMIZATION OF THE ANGARA-YENISEI CASCADE

S.S. Trufakin¹, V.I.Panteleev², E.A. Sovban³, A.G. Rusina⁴

¹JSC «SO UPS» Krasnojarsk RDD 3g, Petra Podzolkova st., Krasnoyarsk, 660020, Russian Federation

²Siberian Federal University 79, Svobodniy pr., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

³JSC «SO UPS» UDD of Siberia 29, Kuzbasskaiya st., Kemerovo, 650091, Russian Federation

⁴Novosibirsk State Technical University 20, K. Marksa pr., Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Abstract. The structure of the Siberian power system installed capacity is characterized by a significant share of hydroelectric power plants. When planning it is necessary to take into account all technical and economic issues due to the high influence of hydroelectric power plants operation mode on the efficiency of the Siberian power system. The aim of hydroelectric power plants operation planning efficiency increasing is urgent, both in terms of ensuring Siberian power system functioning reliability and minimizing the total cost of electricity. In terms of business processes, the problem of water-energy calculations automation is of high importance. The use of optimization methods will provide problem solving more efficiently. In addition, optimization methods allow both electric and water-energy mode parameters to enter the permissible range, which is rather difficult and time-consuming due to many contradictory limitations.

Keywords: hydroelectric power station, cascade of hydropower plants, planning of hydropower plant mode, optimization of HPP mode.

Sergey .S. Trufakin, Chief Specialist, Postgraduate Student. Vasily I.Panteleev (Dr. Sci. (Techn.)), Professor. Ekaterina A. Sovban, Specialist of I Category Anastasiya G. Rusina, (Dr. Sci. (Techn.)), Professor. УДК 621.314

СИСТЕМА КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИИ В СЕТЯХ НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 1000 В С ГЛУХОЗАЗЕМЛЕННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

Э.Н. Фоминич¹, Е.В. Ревякина², И.В. Колесник¹, А.А. Тишков¹

¹ Военный институт (инженерно-технический) Военной академии материально-технического обеспечения Россия, 191123, г. Санкт-Петербург, ул. Захарьевская, 22

² Самарский государственный технический университет Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская 244

Аннотация. Безаварийное функционирование распределительных сетей СЭС с глухозаземленной нейтралью до 1000 В во многом зависит от частоты возникновения однофазных коротких замыканий (КЗ), которые являются наиболее частым видом повреждения изоляции. Существующие устройства защиты от КЗ в сетях с глухозаземленной нейтралью срабатывают при возникновении КЗ, то есть работают по факту. В связи с этим важна оценка состояния изоляции распределительной сети СЭС под рабочим напряжением. Разработка научно-технических решений, обеспечивающих повышение уровня безопасности при эксплуатации систем электроснабжения с глухозаземленной нейтралью, направлена на достижение названных задач. Поставленная иель достигается за счет обеспечения объективного контроля за состоянием электрической изоляции по токам утечки, что позволяет существенно уменьшить вероятность возникновения КЗ за счет заблаговременного обнаружения развивающегося дефекта изоляции. В статье представлена концепция системы контроля и диагностики состояния изоляции электрических сетей с глухозаземленной нейтралью, позволяющей перейти от борьбы с последствиями нарушений изоляции к их предупреждению и, как следствие, существенному повышению электропожаробезопасности.

Ключевые слова: система электроснабжения, глухозаземленная нейтраль, однофазное короткое замыкание, контроль состояния изоляции.

Введение

Надежность работы и безопасность эксплуатации электрооборудования во многом зависят от состояния изоляции, частоты возникновения и длительности существования ее повреждений. По данным МЧС, в 2016 г. из-за нарушения правил эксплуатации электрооборудования возникло 41151 пожаров, что составляет 29,6 % от всех пожаров. Стоит отметить, что значительная часть таких нарушений связана с повреждением изоляции электроустановок и, как следствие, короткими замыканиями.

При замыканиях на корпус (землю) через некоторое переходное

Фоминич Эдуард Николаевич, профессор кафедры «Электроснабжение, электрооборудование и автоматика».

Ревякина Екатерина Викторовна, аспирант.

Колесник Иван Владимирович, адъюнкт кафедры «Электроснабжение, электрооборудование и автоматика».

Тишков Алексей Анатольевич, заместитель начальника кафедры «Электроснабжение, электрооборудование и автоматика».

применении сопротивление автоматическое отключение, основанное на максимальной токовой защиты, срабатывать не будет. Данный режим чрезвычайно опасен, так как протекание даже малых токов в доли ампера в локализованных по объему дефектах изоляции приводит к пиролизу изоляции и в конечном итоге к возгоранию. При этом с увеличением суммарной протяженности кабельной сети системы электроснабжения ухудшаются условия пожаробезопасности. также снижается належность электро-И а Проведенные электроснабжения потребителей. научно-исследовательские работы показали, что выявление развивающихся дефектов изоляции на ранних стадиях позволяет значительно улучшить эти показатели. Такой подход должен заключаться в применении измерительных датчиков, рассчитанных на работу с автоматизированной информационно-измерительной системой, и построении централизованной системы контроля состояния изоляции, осуществляющей одновременную обработку сигналов от всех контролируемых кабельных линий с целью обеспечения мониторинга состояния изоляции и возможности прогнозирования будущих замыканий. Выполнение этих функций возможно за счет сведения всех данных непосредственно к диспетчеру.

Проблемы контроля состояния изоляции с СЭС с глухозаземленной нейтралью

В ПУЭ предусмотрена возможность применения устройств защитного отключения (УЗО), реагирующих на ток утечки. Принцип работы УЗО – пороговый, то есть УЗО реагирует на превышение фиксированного уровня тока утечки, что может быть недопустимо при питании ответственных потребителей. Даже если УЗО будет работать на сигнализацию, то невозможно организовать централизованный контроль за этой сигнализацией, так как УЗО применяются в отдельных периферийных групповых линиях или непосредственно у приемника электроэнергии.

При большом (десятки, сотни) количестве приемников электроэнергии контроль и обслуживание УЗО требуют значительных затрат времени и их применение становится экономически невыгодным. Применение УЗО не позволяет осуществить непрерывный контроль за динамикой изменений токов утечки в контролируемой сети.

Повысить пожаробезопасность электроустановок в таких режимах можно при применении мониторинга дифференциальных токов утечки, что позволяет выявить развивающиеся дефекты и предпринять необходимые меры до возникновения пожароопасных утечек тока.

Применение мониторинга токов утечки необходимо рассматривать применительно к конкретной системе электроснабжения. Наиболее распространенной системой является TN-C-S, ее отличия от системы TN-S заключаются в наличии участка PEN-проводника. В зависимости от длины этого участка условия электро- и пожаробезопасности могут различаться в широком диапазоне. Совмещенный нулевой проводник имеется только на участке от питающего трансформатора до щита, в котором установлены датчики, а после щита идет 5 проводников – три фазы, рабочий нулевой проводник и защитный нулевой проводник.

Достаточно малой эффективностью в определении состояния распределительной сети СЭС обладают и периодические испытания электрооборудования, так как выполняются на обесточенном оборудовании.

Эта информация обладает малой ценностью для прогнозирования состояния изоляции, так как в любой момент после проведения периодических испытаний, будь то через 5 минут, через сутки или через месяц, в изоляции может начать развиваться нарастающий дефект, обнаружить который возможно будет только при очередных испытаниях, если только до этого времени не произойдет ее критическое разрушение, которое повлечет за собой возникновение аварийной ситуации.

Таким образом, в настоящее время отсутствуют технические средства, позволяющие обеспечить мониторинг состояния изоляции в сетях с глухозаземленной нейтралью, которые составляют 95 % распределительных сетей. То есть отсутствует возможность достоверного диагностирования развивающихся дефектов электрической изоляции в этих сетях, и проблема предупреждения возникновения коротких замыканий становится все более актуальной.

Структура системы контроля состояния изоляции в СЭС

с глухозаземленной нейтралью

Система контроля состояния изоляции в системах электроснабжения до 1000 В с глухозаземленной нейтралью может быть реализована по принципу, представленному на рис. 1.



Рис. 1. Структурная схема системы СКСИ СЭС до 1000 В с глухозаземленной нейтралью: 1 – датчики-преобразователи фазных и нулевого проводников; 2 – датчик-преобразователь защитного проводника РЕ

На рисунке условно не показаны возможные соединения друг с другом РЕпроводников различных приемников электроэнергии.

В системе мониторинга токов утечки можно выделить два основных вида датчиков-преобразователей тока:

 датчики-преобразователи дифференциального тока, устанавливаемые либо на трехжильном кабеле питания трехфазных нагрузок, либо на четырехжильном 154

кабеле для трех фаз и рабочего нулевого проводника, либо на двухжильном для фазы и рабочего нулевого проводника;

– датчики-преобразователи тока, устанавливаемые на защитном нулевом проводнике.

В эксплуатационных режимах возможны ложные срабатывания, обусловленные сложной картиной растекания тока утечки. Условно можно выделить следующие варианты преимущественного растекания тока утечки (см. таблицу).

Доминирующий путь утеч- ки	Показания пары датчиков	Интерпретация показаний	
Утечка на изолированную от земли ОПЧ при ее под- ключении к РЕ-проводнику	Сигналы пример- но равны	Однозначная идентификация присо- единения с током утечки. Исправ- ность РЕ-проводника	
Утечка на заземленную ОПЧ с подключением к ней РЕ-проводника	Сигнал от силово- го датчика больше сигнала от защит- ного датчика	Высокая степень идентификации присоединения с током утечки. Воз- можны дефекты РЕ-проводника	
Утечка на заземленную ОПЧ без подключения к ней РЕ-проводника (утечка на землю)	Сигнал от силово- го датчика суще- ственно больше сигнала от защит- ного датчика	Идентификация присоединения с утечкой по показаниям силового датчика-преобразователя. Высокая вероятность повреждения РЕ- проводника	
Утечка на ОПЧ с РЕ- проводником, имеющим связь с другими ОПЧ, запи- танными от других присо- единений	Сигналы от за- щитных датчиков сопоставимы по уровню. Иденти- фикация возможна по сигналу от си- лового датчика- преобразователя	Высокая степень неопределенности в идентификации присоединения с утечкой. Требуется применение специализированного программного обеспечения для анализа	
Утечка на землю вне зоны контроля	Сигналы от за- щитных датчиков сопоставимы по уровню	Высокая степень неопределенности в идентификации присоединения с утечкой. Требуется применение специализированного программного обеспечения для анализа	
Утечка на изолированную от земли ОПЧ при ее под- ключении к РЕ-проводнику вне зоны контроля	Сигналы от за- щитных датчиков сопоставимы по уровню	Высокая степень неопределенности в идентификации присоединения с утечкой. Требуется применение специализированного программного обеспечения для анализа	

Варианты преимущественного растекания тока утечки

Для повышения достоверности обнаружения присоединений с пожароопасными токами утечки необходимо провести анализ сложных комбинаций сигналов от всех пар датчиков, контролирующих токи утечки на силовых кабелях (три фазы и рабочий нулевой проводник) и на защитных нулевых проводниках.

Если РЕ-проводники различных кабелей после места установки датчиков будут иметь соединения между собой, картина существенно меняется. При установке датчиков в защитные нулевые проводники на работе системы будет негативно сказываться наличие гальванической связи между защитными нулевыми проводниками приемников электроэнергии различных кабелей после точки установки датчиков. На практике эта ситуация возможна и будет сочетаться с повторным заземлением. Надо учитывать, что «соседние» PE-проводники тоже обладают сопротивлением. Наихудший вариант – если «соседние» PE-проводники будут иметь большее сечение по сравнению с PE-проводником в поврежденном присоединении. Это возможно при удаленных замыканиях и наличии какой-либо протяженной металлоконструкции (СПЧ), используемой в качестве PE-проводника при наличии других PE-проводников. Если присоединений (кабелей) много и все PE-проводники этих присоединений соединены друг с другом после места повреждения, то в каждом отдельном PE-проводнике присоединений ток будет мал и одинаков и выделить поврежденное присоединение будет невозможно без применения специализированного программного обеспечения. Данная ситуация может иметь место, если несколько кабелены в одно здание.

Если отходящих присоединений много (6...8 и более), то весьма существенно на результатах измерений тока утечки в РЕ-проводнике будут сказываться различия в полном сопротивлении связи между РЕ-проводниками различных приемников электроэнергии, питаемых от контролируемой совокупности фидеров. Наличие связи между защитными проводниками разных присоединений (фидеров) негативно сказывается на результатах обнаружения поврежденного фидера.

Основной проблемой системы мониторинга является большой массив информации, что требует от оператора значительной профессиональной подготовки. Для упрощения эксплуатации системы мониторинга целесообразно провести анализ данных по заданному алгоритму, что позволит минимизировать информационный поток, передавая оператору только актуальную информацию в наглядном виде.

Сравнительный анализ заключается в ранжировании сигналов от всех РЕ-датчиков и отдельно – от всех силовых датчиков с выделением наибольших. Целью является проверка совпадения номеров присоединений с наибольшими значениями сигналов от силовых датчиков с номерами присоединений с наибольшими значениями сигналов от РЕ-датчиков. При совпадении следует вывод о достоверности обнаружения присоединений с наибольшими утечками на ОПЧ, имеющими подключение к РЕ-проводникам. Завершающим этапом является сравнение с заданными абсолютными и относительными порогами с генерацией соответствующих сигналов и их передачей на средства сигнализации и на «верхний» уровень системы мониторинга.

Аналогично производится выявление «наихудших» присоединений, имеющих доминирующую утечку на землю.

Графическую информацию целесообразно выводить для ограниченного количества наихудших с точки зрения пожаробезопасности присоединений, а более подробную – только по запросу.

Во многих случаях более информативными данными являются значения скорости изменения во времени токов утечки, для чего производится дифференцирование графика изменения тока утечки во времени. Эти данные могут быть более информативными по сравнению с графиками изменений во времени токов утечки с позиции задачи прогнозирования процессов деградации состояния изоляции. Для минимизации ложной сигнализации в условиях сложной картины растекания токов утечки необходимо устанавливать не только абсолютные пороги сигнализации (логичной является привязка к стандартным значениям порогов УЗО 30, 100 и 300 мА), но и установление относительных порогов, значения которых привязаны к типичным (характерным) токам утечки конкретной распределительной сети. Количественные значения этих относительных порогов целесообразно задавать в процентах от «нормального» (то есть устойчивого в течение длительного времени) значения измеряемого тока утечки. Такой подход позволяет существенно уменьшить вероятность ложной сигнализации, но требует настройки системы мониторинга по месту эксплуатации.

Реализация системы контроля состояния изоляции с СЭС с глухозаземленной нейтралью

Разрабатываемая система предназначена для мониторинга состояния изоляции в кабельных распределительных сетях с глухозаземленной нейтралью до 1000 В с целью прогнозирования, планирования профилактических мероприятий и ремонтных работ для предотвращения пробоев изоляции и замыканий на землю.



Рис. 2. Плата с датчиками-преобразователями системы ПКСИ: 1 – датчики-преобразователи фазных и нулевого проводников; 2 – датчики-преобразователи защитного проводника РЕ

Система СКСИ работает по принципу измерения переменного тока нулевой последовательности путем преобразования магнитного поля, создаваемого трехфазными токами в контролируемой цепи, в аналоговые сигналы, которые преобразуются в цифровые данные. Реализация такой системы позволит преодолеть серьезную проблему недостаточности существующих технических средств и методов для постоянного контроля за состоянием изоляции. В настоящее время изготовлены и прошли государственные испытания опытные образцы системы пофидерного контроля состояния изоляции, датчики которых представлены на рис. 2.

В разработанной системе СКСИ в качестве первичных чувствительных элементов датчиков-преобразователей дифференциального тока утечки применена катушка Роговского. Конструкция катушки Роговского представляет собой токовый трансформатор с воздушным сердечником. Катушка наматывается на воздушный сердечник такого размера, чтобы через его отверстие могла быть пропущена шина с измеряемым током. Чтобы уменьшить паразитные емкости, витки должны быть намотаны с равными расстояниями друг от друга и в одну сторону. Для исключения влияния витка, создаваемого самой катушкой, ее конец возвращают к началу, прокладывая вдоль окружности тороида. В связи с тем, что выходное напряжение обычно мало, катушку, как правило, экранируют от электрических помех. Экран при этом не должен образовывать короткозамкнутого витка. Выводы катушки должны быть также экранированы, причем один из выводов должен быть соединен с экраном и заземлен.

Поскольку измеряемые токи очень малы, возникает сложность в их передаче на блок обработки из-за сильного затухания и низкой помехоустойчивости. Для решения этих проблем в непосредственной близости от катушки Роговского (в одном корпусе) установлен аналогово-цифровой преобразователь, который преобразует полученный аналоговый сигнал в цифровой вид и передает его на блок обработки. Таким образом, ток нулевой последовательности, измеренный катушкой Роговского и преобразованный в цифровой вид, передается на блок обработки, не подвергаясь воздействию помех и не затухая.

Блок цифровой обработки данных представляет собой конструкцию, состоящую из следующих основных элементов:

- узлы защиты от помех;

- узлы выпрямителей основного и резервного напряжения питания;

– ABP;

- блок интерфейсов;

- устройства индикации результатов измерений.

Разработанная система выполняет следующие функции:

 – ранжирование номеров кабельных присоединений в зависимости от значения тока утечки;

 – сравнение токов утечки с заданными порогами для генерации предупреждающих сообщений и сигнализации;

определение номеров кабелей с наихудшей изоляцией;

- создание графика изменения сигналов во времени;

- корректировка значений порогов сигнализации;

архивирование и визуализация информации;

 проведение сравнительного анализа токов утечки, индивидуальное назначение порогов сигнализации, учет исходных небалансов, возможность оперативной перенастройки;

 новые датчики дифференциального тока обеспечивают высокую чувствительность, а различные варианты конструктивного исполнения – удобный и простой монтаж;

– микропроцессорный блок реализует оригинальный алгоритм обработки сигналов от 8, 16, 32 и более датчиков, основанный на учете особенностей конкретной распределительной сети, что обеспечивает высокую достоверность обнаружения развивающихся дефектов изоляции;

контроль исправности первичных датчиков-преобразователей;

 выполнение необходимой математической обработки значений параметров;

 контроль достоверности параметров и исправности технических средств нижнего уровня в процессе работы системы, ведение протоколов и архивов по ошибкам, отказам и другим отклонениям от нормальных режимов работы, а также статистической информации по работе оборудования;

– формирование и управление базами данных учетных параметров, ведение архивов для решения задач оперативного контроля состояния изоляции, расчета прогнозных значений сопротивления изоляции; формирование экранных форм отображения отчетных документов за расчетные периоды, накопление статистической информации для анализа и прогноза состояния изоляции, планирования профилактических мероприятий и ремонтов с целью повышения надежности электроснабжения;

 представление и управление вводом и выводом необходимой учетной информации в виде текста, гистограмм, графиков, таблиц и т. д. на экран монитора;

- формирование печатных документов произвольной формы;

возможность подключения дополнительных задач и обработки учетной информации.

Система является открытой для пользователя и имеет в своем составе необходимые средства для сопровождения, модернизации и развития. Инструментальное ПО имеет удобный пользовательский интерфейс и обеспечивает генерацию прикладного программного обеспечения и ввода необходимых для этого данных в форме диалога с оператором. Система позволяет обрабатывать данные с использованием стандартных программ.

Особенностью применяемых датчиков тока является малая мощность выходного сигнала, что отличает их от трансформаторов тока напряжения, конструкции которых сформировались достаточно давно – стандартные значения их выходных параметров определялись уровнем развития и состоянием средств автоматики середины XX века. Большая выходная мощность используемых трансформаторов была оправданной, так как от них питались реле автоматики и защиты, средства измерений и регистрации. Современные информационноизмерительные системы (ИИС) имеют на своих входах либо сигнальные процессоры с встроенными аналого-цифровыми преобразователями (АЦП), либо отдельные АЦП, которые не требуют таких мощных сигналов для получения приемлемого отношения сигнал/шум, что привело к возникновению и широкому внедрению концепции датчиков тока малой мощности.

Заключение

Оценка и мониторинг состояния изоляции в реальных условиях функционирования системы электроснабжения, включающих различные режимы работы, является актуальной и сложной задачей. На надежность работы СЭС, электрои пожаробезопасность электрооборудования существенно влияют нештатные режимы работы, предаварийные и аварийные режимы и старение изоляции. В связи с этим важна оценка состояния изоляции распределительной сети в режиме реального времени. При этом рост требований по пожаробезопасности и надежности СЭС должен сопровождаться адекватным развитием средств диагностирования потенциально опасных факторов.

Использование системы пофидерного контроля состояния изоляции в составе программно-аппаратного комплекса дает возможность непрерывного мониторинга состояния изоляции всех контролируемых присоединений, что необходимо для прогноза возможных коротких замыканий в сети с достаточным для оперативных мероприятий запасом времени.

Результаты проведенных испытаний показали, что датчики-преобразователи обладают более существенной чувствительностью по сравнению с применяемыми трансформаторами тока.

Реализация системы пофидерного контроля состояния изоляции позволит решать новые, ранее недоступные задачи:

- наблюдение за динамикой состояния изоляции;

 – сокращение времени нахождения электрических сетей системы электроснабжения в аварийном или предаварийном состоянии;

 исключение аварийного отключения потребителей вследствие замыканий в электрических сетях СЭС, вызванных старением электрической изоляции;

 – контроль за множеством объектов (участки распределительной сети, ответственные приемники электроэнергии);

 – обеспечение оперативности поиска мест повреждения в разветвленных электрических сетях СЭС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Глухов О.А., Иванов Е.А. Применение функциональных возможностей АСУ ТП для обеспечения селективного контроля состояния изоляции присоединений // Автоматизированные системы управления энергетическими ресурсами: Сб. материалов. – СПб.: ПЭИПК, 2005. – 368 с. – С. 166–173.
- Глухов О.А., Михайлов А.К., Фоминич Э.Н., Тишков А.А. Анализ условий применения системы контроля изоляции в системах электроснабжения с изолированной нейтралью // Сборник докладов 9-й Российской НТК по электромагнитной совместимости технических средств ЭМС-2006. – СПб.: ВИТУ, 2006. – С. 196–201.
- 3. Михайлов А.К., Фоминич Э.Н., Глухов О.Ф., Тишков А.А. Системы контроля изоляции в системах электроснабжения с изолированной нейтралью // Технология ЭМС. – 2007. – № 3(22).
- Михайлов А.К., Фоминич Э.Н., Глухов О.Ф., Тишков А.А. Внедрение методов общего и пофидерного контроля изоляции в системах электроснабжения с изолированной нейтралью // Сборник тезисов и докладов IX симпозиума «Электротехника 2030». Перспективные технологии электроэнергетики. – 2007.
- Тишков А.А., Павленок А.М. Разработка системы контроля состояния изоляции в системах электроснабжения с изолированной нейтралью // Сборник научных проблем ВИ(ИТ). – СПб.: Изд-во политехн. ун-та, 2013.
- 6. Глухов О.А., Глухов Д.О. Расчет параметров индукционного датчика тока на базе катушки Роговского // Проблемы энергетики. – 2015. – № 3-4. – С. 124–131.
- 7. Глухов О.А., Глухов Д.О. Влияние сторонних магнитных полей на результаты измерения тока катушкой Роговского // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2015. № 7. С. 56–60.
- 8. Харкевич А.А. Спектры и анализ. М.: Либроком, 2009.
- ГОСТ РВ 20.57.416-98. Комплексная система контроля качества. Изделия электронной техники, квантовой электроники и электротехнические военного назначения. Методы испытаний.
- 10. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности. СПб.: БХВ-Петербург, 2006.

Статья поступила в редакцию 17 января 2018 г.

SYSTEM OF ELECTRICAL INSULATION STATE CONTROL IN NETWORKS WITH VOLTAGES UP TO 1000 VOLTS WITH DEAD-EARTHED NEUTRAL

E.N. Fominich¹, E.V. Revyakina², I.V. Kolesnik¹, A.A. Tishkov¹

¹Military Institute (Engineering) of the Military Academy of Material and Technical Support 22, ul. Zakharievskaya, St. Petersburg, 191123, Russian Federation

²Samara State Technical University 244, Molodogyardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

Abstract. Trouble-free operation of the PSS distribution networks with dead-earthed neutral up to 1000 volts largely depends on the frequency of single-phase short-circuit (SC), which are the most common type of insulation failure. Existing short-circuit protection devices in networks with earthed neutral trigger in the event of short circuit, that is work in the event of the fault, but a rather long-term process of insulation defect development is not detected. In connection with this the assessment of the PSS distribution network isolation under operating voltage proves to be important. Development of scientific and technical solutions that enhance safety in the operation of power systems with earthed neutral is aimed at achieving the above-mentioned goals. The goal is achieved through the provision of objective monitoring of the state of electrical insulation leakage current. This allows to significantly reduce the risk of short-circuit due to early detection of developing insulation defect. The article offers the concept of system of electrical insulation with earthed neutral control and diagnostics, which allows to transfer from the fight with the consequences of insulation damage to its prevention and to a significant increase in its electro- and fire safety.

Keywords: power system, dead-earthed neutral, single-phase short circuit, control of insulation condition.

Eduard N. Fominich, Professor. Ivan V. Kolesnik, Adjunct. Ekaterina V. Revyakina, Postgraduate Student. Aleksey A. Tishkov, Deputy Head of the Department.