выработки электроэнергии $W_{эфф}$ на 1 МВт установленной мощности, то данный показатель составит 4,17 млн кВт·ч на 1 МВт по итогам года. Очевидно, что КИУМ и $W_{эфф}$ являются разными по смысловому содержанию параметрами, но могут иметь сильную корреляцию. Поэтому по мере дальнейших исследований, потребуется уточнение математического соотношения, по которому ведётся вычисление искомого параметра $W_{эфф}$. Одним из ожиданий от дальнейших исследований является проверка гипотезы о том, что малые и средние по установленной мощности гидроагрегаты ГЭС [9], при прочих равных или схожих условиях, могут работать эффективнее крупных гидроагрегатов ГЭС.

В настоящее время ведутся расчёты и уточнения КИУМ и $W_{эфф}$ для ГЭС и гидроагрегатов ГЭС Таджикистана в начальном приближении. Условием проведения дальнейших исследований и подготовкой к физическим экспериментам является выполнение структурного анализа распределения установленной мощности и выработки электроэнергии на ГЭС. Для этого будет реализован следующий этап исследований, на котором будут определены следующие условно-постоянные параметры гидроагрегатов, которыми являются паспортные характеристики турбин и генераторов и будут определены объёмы мощностей и выработки электроэнергии по типам и заводам-изготовителям гидроагрегатов ГЭС Таджикистана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Министерство энергетики и водных ресурсов Республики Таджикистан. – URL: https://www.mewr.tj/ (дата обращения 02.11.24).
2. Гидроэнергетика Таджикистана: потенциал сегодня и возможности завтра / Н. Казеева, М. Козырева // Энергетическая политика. – 2023. – Т. 182. – No. 4. – С. 58–65.
3. Гидроэнергетические ресурсы Таджикистана и их использование / Г.Н. Петров // Центральная Азия и Кавказ. Журнал социально-политических исследований. «Central asia and Caucfsus». – 2003. – Т. 27. – No. 3. – С. 1–15.
4. Гидроэнергетика Таджикистана и ее уязвимость в условиях изменения климата / А. Д. Ахорова, Ш. Н. Саидова // Политехнический вестник. Серия Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2020. – Т. 49. – No. 1. – С. 38–43.
5. Халиков Х. Теоретико-прикладные основы комплексного использования водно-энергетических ресурсов Таджикистана: дис. канд. тех. наук. – Душанбе, 2022. – 183 с.
6. Пичугова О.А. Обзор численности и установленной мощности гидроэлектростанций энергосистемы Таджикистана // Сборник статей II Всероссийской с международным участием молодёжной конференции «Бутаковские чтения» / под ред. А.С. Заворина. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2022. – С. 463–466.
7. ОАХК «БАРКИ ТОЧИК». Исследования ТЭО проекта строительства Рогунской ГЭС. Фаза II: Варианты определений проекта. Том 3: Инженерия и Проектирование. Глава 5: Исследования по моделированию эксплуатации водохранилища. 2014. 122 с.
8. Перечень основных гидроэнергетических сооружений Республики Таджикистан // – URL: http://cawater-info.net/bk/dam-safety/pdf/hps_tj_r.pdf (дата обращения 30.10.24).
9. Стратегия развития малой гидроэнергетики Республики Таджикистан. 2007. 117 стр.
10. Султонов Ш.М. Оптимизация режимов работы энергосистемы с высокой долей гидроэлектростанций (на примере энергосистемы Таджикистана): дис. канд. тех. наук. – Новосибирск, 2016. – 163 с.
11. Топографическая карта мира. // – URL: https://ru-ru.topographic-map.com/map/?center=38.04488%2C69.06019&zoom=16&popup=38.04613%2C69.05973 (дата обращения 05.11.24).

ОЦЕНКА РОБАСТНОСТИ РЕГУЛЯТОРА НАПРЯЖЕНИЯ АВТОНОМНОГО ИНВЕРТОРА

Ф.В. Перевощиков

Томский политехнический университет, ИШЭ, ОЭЭ, группа А2-28

Научный руководитель: В.Г. Букреев, д.т.н., профессор ОЭЭ ИШЭ ТПУ

Системы электропитания современных регулируемых электроприводов в большинстве своем содержат автономные инверторы напряжения (АИН) с широтно-импульсным регулированием (ШИМ), которые формируют необходимые траектории кривых фазового портрета системы [1, 2]. Известно, что импульсное регулирование, на котором базируется любой АИН

предполагает искажение спектрального состава выходных токов и напряжений преобразователя, что в свою очередь не лучшим образом отражается на работе агрегата в целом (по параметрам энергоэффективности электропривода и качества регулирования угловой скорости). В ряде работ были предложены пути решения улучшения коэффициента гармонических искажений (КГИ) фазных токов [2–6]. Автором предлагается использование регулирование по отклонению модуля вектора фазных напряжений АИН с помощью регулятора, синтезированного при помощи корневых методов

$$W_{\text{рег}}(z) = K\frac{a_{nz3}\cdot z^{-3} + a_{nz2}\cdot z^{-2} + a_{nz1}\cdot z + 1}{b_{nz3}\cdot z^{-3} + b_{nz2}\cdot z^{-2} + b_{nz1}\cdot z + 1}, \quad (1)$$

где

$$K = \frac{a_{z0}}{b_{z0}};\ a_{nz3} = \frac{a_{z3}}{a_{z0}};\ a_{nz2} = \frac{a_{z2}}{a_{z0}};\ a_{nz1} = \frac{a_{z1}}{a_{z0}};\ b_{nz3} = \frac{b_{z3}}{b_{z0}};\ b_{nz2} = \frac{b_{z2}}{b_{z0}};\ b_{nz1} = \frac{b_{z1}}{b_{z0}};$$

$$a_{z3} = -8\cdot a_3\cdot f_{\text{д}}^3 + 4\cdot a_2\cdot f_{\text{д}}^2 - 2\cdot a_1\cdot f_{\text{д}} + a_0;\ a_{z2} = 24\cdot a_3\cdot f_{\text{д}}^3 - 4\cdot a_2\cdot f_{\text{д}}^2 - 2\cdot a_1\cdot f_{\text{д}} + 3\cdot k_{\text{ф}};$$

$$a_{z1} = -24\cdot a_3\cdot f_{\text{д}}^3 - 4\cdot a_2\cdot f_{\text{д}}^2 + 2\cdot a_1\cdot f_{\text{д}} + 3\cdot k_{\text{ф}};\ a_{z0} = 8\cdot a_3\cdot f_{\text{д}}^3 + 4\cdot a_2\cdot f_{\text{д}}^2 + 2\cdot a_1\cdot f_{\text{д}} + k_{\text{ф}};$$

$$b_{z3} = -8\cdot b_3\cdot f_{\text{д}}^3 + 4\cdot b_2\cdot f_{\text{д}}^2 - 2\cdot b_1\cdot f_{\text{д}};\ b_{z2} = 24\cdot b_3\cdot f_{\text{д}}^3 - 4\cdot b_2\cdot f_{\text{д}}^2 - 2\cdot b_1\cdot f_{\text{д}};$$

$$b_{z1} = -24\cdot b_3\cdot f_{\text{д}}^3 - 4\cdot b_2\cdot f_{\text{д}}^2 + 2\cdot b_1\cdot f_{\text{д}};\ b_{z0} = 8\cdot b_3\cdot f_{\text{д}}^3 + 4\cdot b_2\cdot f_{\text{д}}^2 + 2\cdot b_1\cdot f_{\text{д}};\ a_3 = T_3;\ a_2 = T_2;$$

$$a_1 = T_1;\ a_0 = T_0;\ b_3 = R\cdot\gamma^3;\ b_2 = R\cdot\gamma^2\cdot A_2;\ b_1 = R\cdot\gamma\cdot A_1;\ T_3 = T_{\text{аин}};\ T_2 = T_{\text{аин}}\cdot\zeta + 1;\ T_1 = T_{\text{аин}}\cdot k_{\text{ф}} + \zeta;$$

$$T_0 = k_{\text{ф}};\ R = k_{\text{аин}}\cdot k_{\text{ф}}\cdot k_{\text{дн}};\ k_{\text{ф}}$$

– обратная величина произведения индуктивности синус-фильтра, подключенного к выходу АИН $L_{\text{ф}}$ и емкости синус-фильтра $C_{\text{ф}}$; ζ – отношение активного паразитного сопротивления фильтра $R_{\text{ф}}$ к индуктивности $L_{\text{ф}}$; $T_{\text{аин}}$ – постоянная времени АИН, равная величине обратной несущей частоты ШИМ; $k_{\text{дн}}$ – коэффициент передачи датчика напряжения; $k_{\text{аин}}$ – коэффициент передачи АИН; γ – нормировочный коэффициент выбранного для синтеза полинома

Особый интерес при таком подходе организации управления АИН представляет способность данного регулятора отрабатывать ряд параметрических возбуждений: изменение частоты ШИМ и изменение параметров синус-фильтра в результате тепловых воздействий и наработки при различных значениях γ. Для оценки робастности регулятора изменим параметры, входящие в состав его уравнений на ±20 %. Результаты представлены на рис. 1–4 для $\gamma=2\cdot10^{-4}$ с. Зеленый луч соответствует увеличению варьируемого параметра на 20 %; розовый луч соответствует увеличению параметра на 10 %; черный луч соответствует исходному переходному процессу; синий луч соответствует уменьшению параметра на 10 %; красный луч соответствует уменьшению параметра на 20 %

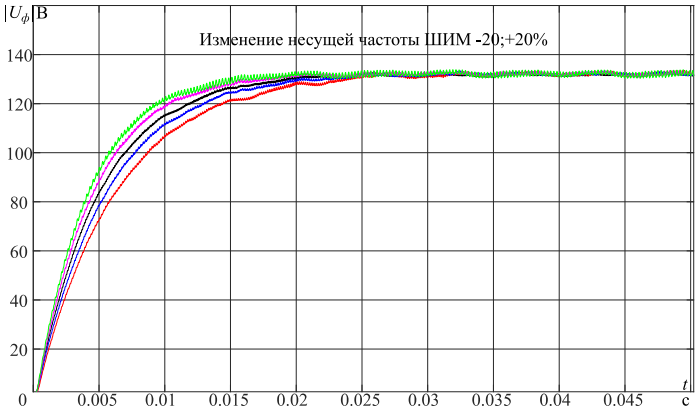

Рис. 1. Отработка задания регулятором при изменении несущей частоты ШИМ

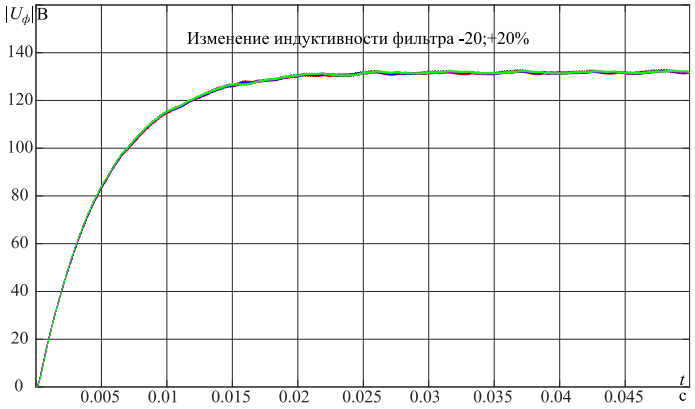

Рис. 2. Отработка задания регулятором при изменении индуктивности $L_ф$ синус-фильтра

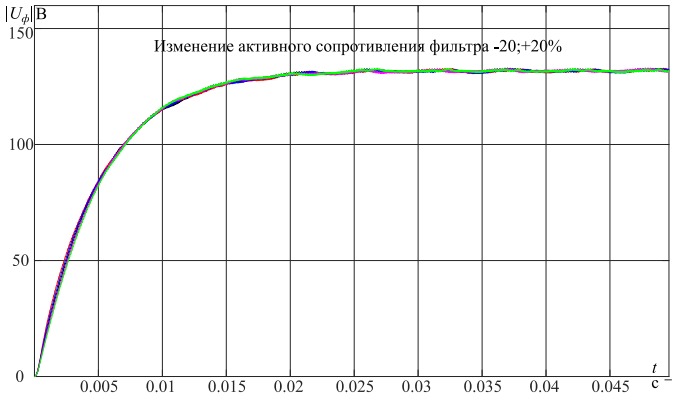

Рис. 3. Отработка задания регулятором при изменении активного сопротивления $R_ф$ синус-фильтра

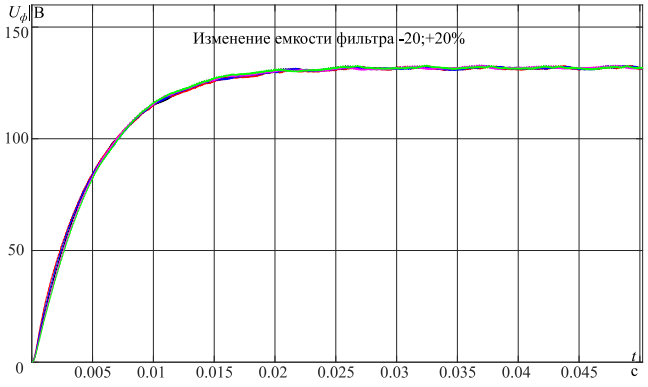

Рис. 4. Отработка задания регулятором при изменении емкости $C_ф$ синус-фильтра

Из вышеприведенных рисунков видно, что в статическом режиме работы регулятор отрабатывает параметрические возмущения объекта регулирования, что особенно важно в осложненных условиях эксплуатации при изменении температуры окружающей среды, в которой находится прибор. Так как параметры дросселя ($L_ф$, $R_ф$) и электролитических конденсаторов ($C_ф$), используемых в синус-фильтре могут существенно дрейфовать с увеличением наработки. Последний факт говорит о том, что параметры регулятора, рассчитанные и заложенные в оборудование при поставке, могут существенно отличаться от требуемых с течением времени, что в свою очередь может подтолкнуть систему управления преобразователя к некорректной отработке внешних воздействий, а это уже может привести к выходу из строя самого АИН, так и систему электропитания в целом. Однако, предложенный подход позволят избежать данной ситуации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. – УРО РАН, 2000.
2. Богданов А.А., Быстров Е.А. Анализ влияния алгоритма и режимов работы трехфазного инвертора на спектральный состав выходных токов // Электронные и электромеханические системы и устройства: сб. науч. трудов. – Томск, 2016. – С. 93–97.
3. Анучин А.С. Системы управления электроприводов: учебник для вузов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2015. – 373. с.
4. Браславский И.Я., Костылев А.В., Цибанов Д.В. Исследование оптимальных пусковых процессов в системе» реальная сеть-ПЧ-АД» // Электротехника. – 2012. – № 9. – С. 35–39.
5. Zelechowski M. Space vector modulated–direct torque controlled (dtc– svm) inverter–fed induction motor drive // Warsaw University of Technology Faculty of Electrical Engineering Institute of Control and Industrial Electronics. – 2005.
6. Chao W., Qiang G., Jing T. An Implementation Method of SVPWM Modulation Algorithm // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing. – 2019. – Т. 646. – № 1. – С. 012066.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МИНИМАЛЬНО НЕОБХОДИМОГО ЧИСЛА ИЗМЕРЕНИЙ НАПРЯЖЕНИЙ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ФАЗ ПОДКЛЮЧЕНИЯ СЧЕТЧИКОВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УЧЕТА К НИЗКОВОЛЬТНОЙ СЕТИ МЕТОДОМ КОРРЕЛЯЦИОННОГО АНАЛИЗА

И.А. Пузанов

Институт систем энергетики имени Л.А. Мелентьева СО РАН, отдел ЭЭС

Научный руководитель: Е.В. Болоев, к.т.н., с.н.с.

Счетчики интеллектуальной системы учета электроэнергии (ИСУ ЭЭ) устанавливаются электросетевыми организациями в низковольтных сетях на вводах распределительного устройства (РУ) трансформаторной подстанции (ТП) и в узлах подключения потребителей. Эти счетчики применяют для следующих целей:

- коммерческого и технического учета электроэнергии;
- измерения текущих параметров режима: действующие (среднеквадратичное) значения фазных токов; фазных и междуфазных напряжений; углов сдвига фаз между напряжениями и токами; однофазных и трехфазных активных и реактивных мощностей; коэффициентов мощности; частоты сети (период измерений параметров – 200 мс);
- измерения интервальных показаний: усредненных среднеквадратических значений токов и напряжений, активных и реактивных мощностей за интервалы времени от 1 до 60 мин;
- измерения показателей качества электроэнергии.

При достоверно известных фазах подключения счетчиков к сети текущие измерения и интервальные показания используют в качестве исходных данных для решения задач расчета потокораспределения и потерь электроэнергии [1], оценивания состояния [2], балансировки фазных нагрузок потребителей [3], выявления бездоговорного и безучетного электропотребления [4].

Счетчики не имеют устройств идентификации фаз подключения к сети. Информация о фазах подключения счетчиков потребителей к сети не отслеживается эксплуатационным персоналом и зачастую не отражена на принципиальной схеме сети. В связи с этим, возникает проблема идентификации фаз подключения счетчиков к сети.

Задачу определения фаз подключения счетчиков потребителей к сети принято называть фазовой идентификацией (ФИ) [4]. Задача ФИ решается при внедрении ИСУ ЭЭ. На принципиальной схеме сети возле счетчика указывается фазы его подключения к сети. При вводе счетчика в работу после поверки или при ремонте сетей может произойти изменение фазы подключения счетчика к сети. Поэтому для проверки соответствия между реальным подклю-