

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ НА УРОВЕНЬ ПОТРЕБЛЕНИЯ АКТИВНОЙ И РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ СЭС УГОЛЬНОЙ ШАХТЫ, НЕ УЧАСТВУЮЩИХ В РЕГУЛИРОВАНИИ УРОВНЯ НАПРЯЖЕНИЯ

В работе выполнена оценка влияния элементов системы электроснабжения (СЭС) не участвующих в регулировании напряжения, на уровень потребления активной и реактивной мощности в СЭС угольной шахты. Определены регулирующие эффекты этих элементов сети в отношении общего уровня потребления СЭС. Установлены основные закономерности и функциональные связи между параметрами элементов, характеристиками нагрузки и уровнем потерь активной и реактивной мощности. Выявлено, что полученные закономерности должны быть учтены при управлении режимом СЭС угольной шахты по критерию минимума потребления активной мощности.

Ключевые слова: регулирование напряжения, потери активной мощности, оптимизация уровня напряжения, угольная шахта.

При управлении уровнем напряжения в СЭС угольной шахты по критерию минимума потребления активной мощности необходимо иметь понимание о влиянии каждого элемента сети на уровень потребления активной и реактивной мощности, в том числе элементов, которые непосредственно не участвуют в регулировании напряжения.

К таким элементам относятся электроустановки, параметры которых не могут быть изменены в процессе функционирования СЭС: передвижные участки подземные подстанции (ПУПП), кабельные линии, токоограничивающие реакторы.

В процессе изменения режима работы СЭС угольной шахты может изменяться нагрузка этих элементов. Любое изменение нагрузки приводит к нелинейному изменению производных параметров элементов (потери активной и реактивной мощностей, потери напряжения и пр.) [1–3]. Для оценки влияния элементов СЭС, не участвующих в регулировании напряжения, на уровень потребления активной и реактивной мощностей, необходимо проанализировать характер изменения потерь напряжения и потерь активной и реактивной мощностей. Отметим, что потери активной и реактивной мощности на вышеуказанных элементах являются собственным потреблением элементов сети и вносят вклад в общий уровень потребления СЭС.

Влияние на уровень потребления активной и реактивной мощности определяется регулирующим эффектом, который характеризует изменение потребляемой мощности в процентах при изменении напряжения на один процент [4, с. 15]. Фактически

регулирующие эффекты по активной (a_1) и реактивной (b_1) мощности определяются по формулам:

$$a_1 = \frac{d\Delta P}{dU}, \quad (1)$$

$$b_1 = \frac{d\Delta Q}{dU}, \quad (2)$$

где ΔP , ΔQ — потери активной и реактивной мощностей, U — уровень напряжения в сети.

Выполним оценку влияния на уровень потребления активной и реактивной мощности отдельных элементов СЭС угольной шахты.

Кабельные линии. В общем случае кабельные линии (КЛ) до 35 кВ при расчете представляют в виде П-образной схемы замещения, в которой активные и емкостные проводимости не учитываются [5]. Активное и реактивное сопротивление КЛ может быть определено по формулам:

$$R=r_0 l, \quad X=x_0 l, \quad (3)$$

где l — длина линии (км), r_0 (Ом/км), x_0 (Ом/км) — погонные параметры линии.

Потери напряжения в КЛ определяются по формуле:

$$\Delta U_A = \sqrt{3} I (R \cos \varphi + X_0 \sin \varphi) = \frac{PR + QX}{U}, \quad (4)$$

Потери активной и реактивной мощностей в КЛ определяются по формулам [6]:

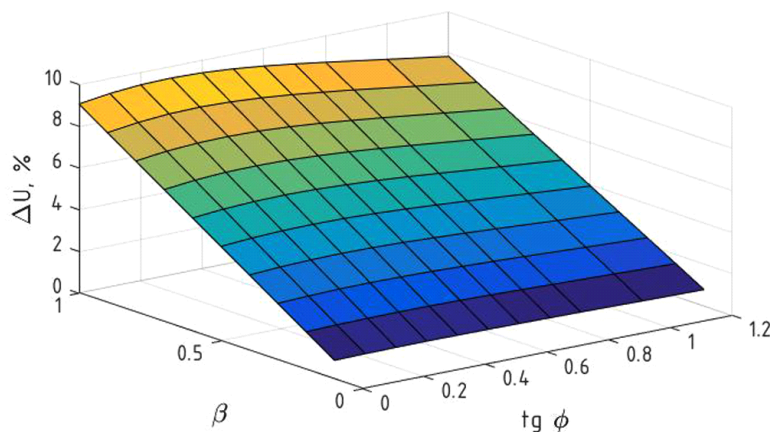


Рис. 1. Зависимость потерь напряжения от коэффициента реактивной мощности нагрузки и коэффициента загрузки кабеля марки КГЭШ 3×95+1×10

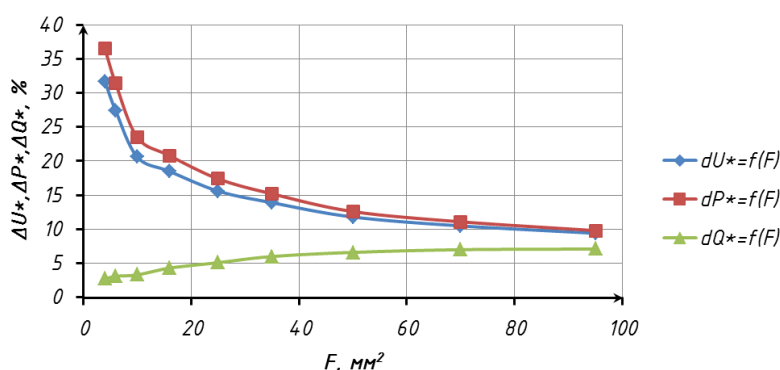


Рис. 2. Зависимости ΔU , ΔP , $\Delta Q=f(F)$ кабелей марок КГЭШ ($l = 1$ км) при номинальной нагрузке

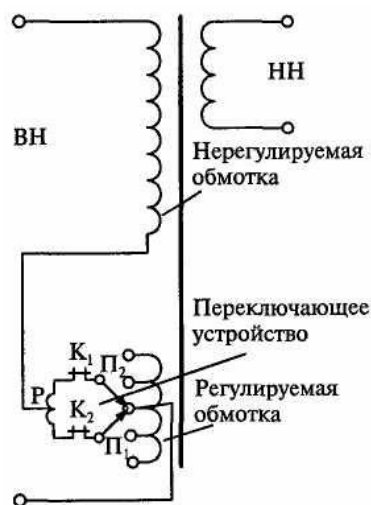


Рис. 3. Схема регулирования без возбуждения (ПБВ)

$$\Delta P_A = \frac{S^2}{U^2} R = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} R = \frac{P^2(1 + tg^2 \varphi)}{U^2} R, \quad (5)$$

$$\Delta Q_A = \frac{S^2}{U^2} X = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} X = \frac{P^2(1 + tg^2 \varphi)}{U^2} X, \quad (6)$$

где P — активная нагрузка КЛ, кВт; Q — реактивная нагрузка КЛ, кВАр; S — полная нагрузка КЛ, кВА; $tg \varphi$ — коэффициент реактивной мощности нагрузки КЛ.

Зависимость потерь напряжения от коэффициента реактивной мощности нагрузки и коэффициента загрузки кабеля марки КГЭШ 3×95+1×10

длиной 1 км представлена на рис. 1.

По формулам (3–6) также были получены зависимости уровня относительных потерь напряжения и мощности ΔU^* , ΔP^* , $\Delta Q^*=f(F)$ от сечения кабеля марки КГЭШ длиной 1 км при номинальной нагрузке, где $\Delta U^* = \Delta U / U_{\text{ном}}$, $\Delta Q^* = \Delta Q / Q$, $\Delta P^* = \Delta P / P$. Полученные зависимости приведены на рис. 2.

Проведенный анализ, а также данные рис. 1–2 показывают следующее:

— продифференцировав выражения (5–6) по формулам (1–2), получено, что регулирующий эффект потерь активной и реактивной мощности в КЛ постоянен и равен –2;

— при увеличении сечения кабеля происходит уменьшение потерь напряжения и относительных потерь активной мощности, следовательно, снижается влияние КЛ на уровень потребления активной мощности в СЭС. При этом возрастает влияние КЛ на уровень потребления реактивной мощности в СЭС;

— учитывая преобладание активного сопротивления над индуктивным сопротивлением, при постоянной токовой нагрузке и увеличении коэффициента реактивной мощности нагрузки происходит уменьшение потерь напряжения в кабеле;

— влияние КЛ на уровень потребления определяется ее загрузкой, сечением и коэффициентом реактивной мощности нагрузки.

Передвижные участковые подземные подстанции (ПУПП). Параметры схемы замещения ПУПП определяются по каталожным или паспортным данным. Необходимо учитывать, что на ПУПП имеются устройства переключения без возбуждения (ПБВ),

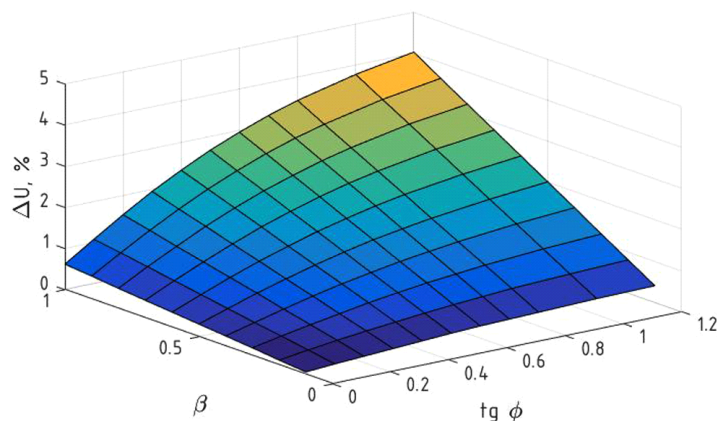


Рис. 4. Зависимость потерь напряжения (ΔU , %) от коэффициента реактивной мощности нагрузки ($\operatorname{tg} \phi$) и коэффициента загрузки (β) ПУПП марки КТПВ-1000

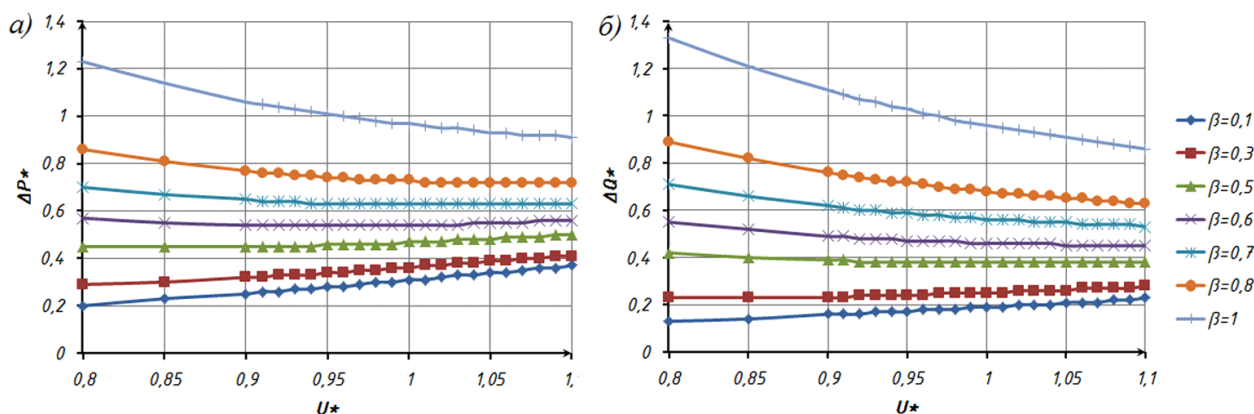


Рис. 5. Зависимости потерь активной (а) и реактивной (б) мощности от уровня напряжения питающей сети при различных значениях коэффициента загрузки ПУПП марки КТПВ-1000/6

положение которых оказывает влияние на параметры схемы замещения ПУПП [7].

Схема фазных обмоток с регулировочными отключениями трансформаторов ПБВ представлена на рис. 3.

Рис. 3 показывает, что при изменении положения устройства ПБВ от «-2» до «2» активное и индуктивное сопротивления обмотки увеличиваются. Практически на угольных шахтах ПБВ ПУПП находятся в положении «-1».

Учитывая наличие устройства ПБВ, параметры схемы замещения ПУПП, приведенные к напряжению 6 кВ, определяются по следующим формулам:

$$R_{\text{ПУПП}} = \frac{\Delta P_k (U_{\text{ном}} (1 + n \cdot \Delta U_{\text{см}}'))^2}{S_{\text{ном}}^2 \cdot 10^3}, \quad (7)$$

где $R_{\text{ПУПП}}$ — активное сопротивление ПУПП (Ом), ΔP_k — потери короткого замыкания (кВт), $U_{\text{ном}}$ — номинальное напряжение (кВ), $S_{\text{ном}}$ — номинальная мощность ПУПП (кВА), n — номер отпайки ПБВ.

$$Z_{\text{ПУПП}} = \frac{u_{k\% \text{отв}} (U_{\text{ном}} (1 + n \cdot \Delta U_{\text{см}}'))^2}{100 \cdot S_{\text{ном}}}, \quad (8)$$

где $Z_{\text{ПУПП}}$ — полное сопротивление ПУПП (Ом), $u_{k\% \text{отв}}$ — номинальное напряжение короткого замыкания, %.

$$X_{\text{ПУПП}} = \sqrt{Z_{\text{ПУПП}}^2 - R_{\text{ПУПП}}^2}, \quad (9)$$

где $X_{\text{ПУПП}}$ — индуктивное сопротивление ПУПП (Ом).

Потери напряжения в ПУПП определяются по формуле [8]:

$$\begin{aligned} \Delta U_{\text{ПУПП}} &= \sqrt{3} I (R_{\text{ПУПП}} \cos \phi + X_{\text{ПУПП}} \sin \phi) = \\ &= \frac{PR_{\text{ПУПП}} + QX_{\text{ПУПП}}}{U}, \end{aligned} \quad (10)$$

Зависимость потерь напряжения от коэффициента реактивной мощности нагрузки и коэффициента загрузки ПУПП марки КТПВ-1000 представлена на рис. 4.

Из рис. 4 следует, что с увеличением коэффициента реактивной мощности нагрузки увеличивается диапазон изменения потерь напряжения при изменении коэффициента загрузки ПУПП от 0 до 1. Следовательно, с увеличением коэффициента реактивной мощности усиливается регулирующий эффект ПУПП в отношении уровня потребления его электроприемников.

Влияние ПУПП на уровень потребления активной и реактивной мощностей также характеризуется изменением уровня потерь активной и реактивной мощности в зависимости от уровня напряжения питающей сети.

Потери активной и реактивной мощности в ПУПП можно определить по формулам:

$$\Delta P_{\text{ПУПП}}(U) = \frac{(\beta \cdot S_{\text{ном}})^2}{U^2} \frac{\Delta P_k (U_{\text{ном}} (1 + n \cdot \Delta U_{\text{см}}'))^2}{S_{\text{ном}}^2 \cdot 10^3} +$$

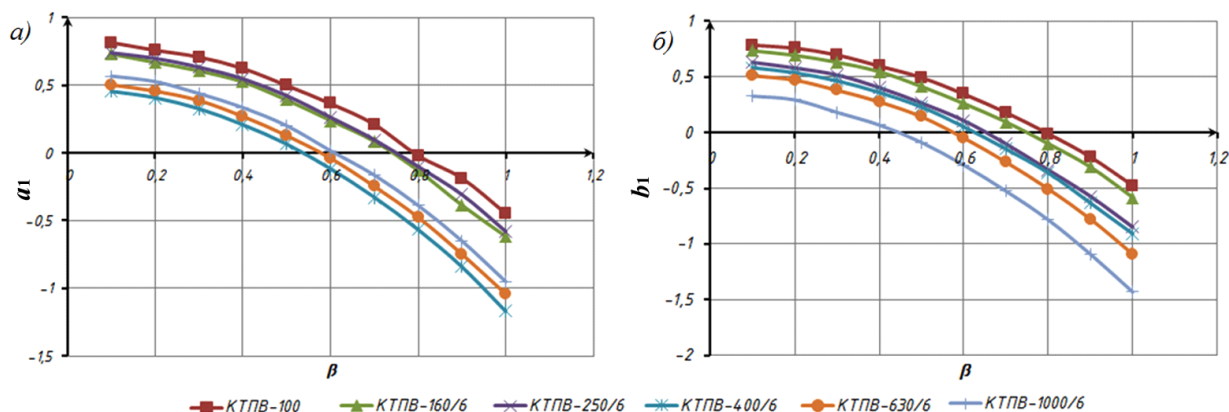


Рис. 6. Регулирующие эффекты ПУПП разных марок по потерям активной (а) и реактивной (б) мощности в зависимости от коэффициента загрузки β

$$+ \Delta P_x \cdot \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right)^2, \quad (11)$$

$$\Delta Q_{\text{ПУПП}}(U) = \frac{(\beta \cdot S_{\text{ном}})^2 (U_{\text{ном}}(1 + n \cdot \Delta U_{\text{ст}}))^2}{U^2 S_{\text{ном}}} \cdot \sqrt{\frac{u_k^2}{10000} - \frac{\Delta P_k^2}{S_{\text{ном}}^2}} + \Delta Q_x \cdot \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right)^2, \quad (12)$$

где ΔP_x , ΔQ_x — активные и реактивные потери холостого хода, β — коэффициент загрузки ПУПП.

Принимая, что устройство ПБВ находится в положении «-1» и $U_{\text{ном}}$ равно 6 кВ, получим следующие выражения:

$$\Delta P_{\text{ПУПП}}(U) = \frac{34,2 \cdot \beta^2 \cdot \Delta P_k}{U^2} + \Delta P_x \cdot \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right)^2, \quad (13)$$

$$\Delta Q_{\text{ПУПП}}(U) = \frac{34,2 \cdot \beta^2 \cdot S_{\text{ном}}}{U^2} \sqrt{\frac{u_k^2}{10000} - \frac{\Delta P_k^2}{S_{\text{ном}}^2}} + \Delta Q_x \cdot \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right)^2, \quad (14)$$

Статические характеристики потерь активной и реактивной мощности по напряжению, построенные по выражениям (13) и (14) для ПУПП марки КТПВ-1000/6, представлены на рис. 5. При этом $\Delta P' = \Delta P_{\text{ПУПП}}(U) / \Delta P_{\text{ном}}$ и $\Delta Q' = \Delta Q_{\text{ПУПП}}(U) / \Delta Q_{\text{ном}}$, где $\Delta P_{\text{ном}}$ и $\Delta Q_{\text{ном}}$ — потери активной и реактивной мощности в ПУПП при номинальной загрузке и нейтральном положении ПБВ «0».

Также был выполнен анализ регулирующих эффектов потерь активной и реактивной мощности для ПУПП различных номиналов [9]. Регулирующие эффекты получены путем аппроксимации зависимостей $\Delta P' = f(U')$ и последующим дифференцированием функции по формулам (1) и (2).

Графики зависимости регулирующих эффектов ПУПП по потерям активной a_1 и реактивной мощности b_1 в зависимости от коэффициента загрузки β представлены на рис. 6.

Данные рис. 5–6 позволяют сделать следующие выводы:

— при $\beta = 0,6 - 0,7$ потери мощности в ПУПП практически не зависят от уровня напряжения. При

этом, согласно [10], при такой загрузке КПД трансформатора имеет максимальное значение. Следовательно, если загрузка трансформатора соответствует максимальному КПД, уровень потерь мощности в трансформаторе практически не зависит от напряжения;

— характер изменения потерь активной мощности в ПУПП неоднозначен и зависит от коэффициента загрузки и соотношения ΔP_k и ΔP_x ;

— с увеличением загрузки ПУПП регулирующий эффект потерь активной и реактивной мощности становится отрицательным. При загрузке ниже критического значения уровень потерь активной мощности возрастает;

— регулирующий эффект потерь активной мощности в ПУПП изменяется в пределах от $-1,17$ до $0,51$;

— регулирующий эффект потерь реактивной мощности в ПУПП изменяется в пределах от $-1,53$ до $0,786$;

— статические характеристики потерь реактивной мощности по напряжению имеют более крутой характер и регулирующий эффект ПУПП по потерям реактивной мощности более значителен;

— с увеличением номинальной мощности ПУПП значение критической загрузки, при которой наблюдается отрицательный эффект в отношении уровня потерь активной и реактивной мощностей, уменьшается.

Токоограничивающие реакторы. В связи с развитием коммутационного оборудования реакторы получают все меньшее распространение в СЭС угольных шахт.

Для реактора параметром, характеризующим уровень потребления реактивной мощности, является индуктивное сопротивление, которое может быть определено по формуле:

$$X_p = \frac{x_{p\%} \cdot U_{p,\text{ном}}}{100 \cdot \sqrt{3} I_{p,\text{ном}}}, \quad (15)$$

Потери активной мощности в реакторе принимаются равными «0». При этом потери реактивной мощности в реакторе определяются по формуле (6), а потери напряжения в реакторе определяются по формуле (16).

$$\Delta U_p = \sqrt{3} I X_p \sin \varphi = \frac{Q X_p}{U}. \quad (16)$$

Регулирующий эффект реактора равен — 2, так как с увеличением напряжения на 1 % наблюдается снижение потерь реактивной мощности на 2 %.

Таким образом, авторами был выполнен подробный анализ влияния элементов СЭС, не участвующих в регулировании напряжения, на уровень потребления активной и реактивной мощности. Результаты анализа показывают, что они оказывают значительное влияние на уровень потребления активной и реактивной мощности, что должно быть учтено при выполнении оптимизации уровня напряжения по критерию минимума потребления активной мощности в СЭС угольной шахты.

Библиографический список

1. Миновский Ю. П. Эффективность электроснабжения забоев угольных шахт. М.: Недра, 1990. 160 с. ISBN 5-247-01209-7.
2. Гойхман В. М., Миновский Ю. П. Регулирование электропотребления и экономия электроэнергии на угольных шахтах. М.: Недра, 1988. 187 с. ISBN 5-247-00242-3.
3. Иванов В. С., Соколов В. И. Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий. М.: Энергоатомиздат, 1987. 336 с.
4. Конюхова Е. А. Режимы напряжений и компенсация реактивной мощности в цеховых электрических сетях. М.: Энергопрогресс, 2000. 54 с. ISBN 5-7046-0563-X.
5. Герасименко А. А., Федин В. Т. Передача и распределение электрической энергии. 4-е изд., стер. М.: КНОРУС, 2014. 648 с. ISBN 978-5-406-03226-8.

6. Железко Ю. С., Артемьев А. В., Савченко О. В. Расчет, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях. Руководство для практических расчетов. М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2002. 280 с. ISBN 5-93196-264-6.

7. Маркушевич Н. С. Регулирование напряжения и экономия электроэнергии. М.: Энергоатомиздат, 1984. 104 с.

8. ГОСТ Р 52719—2007 Трансформаторы силовые. Общие технические условия. Введ. 2008—01—01. М.: Стандартинформ, 2007. 45 с.

9. Губко А. А. Электрооборудование и электроснабжение горных предприятий. Изд. 2-е. Белово: Беловский полиграфист, 2008. 534 с. ISBN 5-85471-114-1.

10. Вольдек А. И., Попов В. В. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы. СПб.: Питер, 2008. 320 с. ISBN 978-5-469-01380-8.

НЕПША Федор Сергеевич, старший преподаватель кафедры «Электроснабжение горных и промышленных предприятий».

Адрес для переписки: nepshafs@gmail.com

ЕФРЕМЕНКО Владимир Михайлович, кандидат технических наук, профессор кафедры «Горные машины и комплексы».

Адрес для переписки: evm-47@mail.ru

Статья поступила в редакцию 07.08.2017 г.

© Ф. С. Непша, В. М. Ефременко

Книжная полка

Клевцов, А. Бесконтактные устройства пуска и торможения электродвигателей : учеб. пособие / А. Клевцов. — М. : Инфра-Инженерия, 2018. — 188 с. — ISBN 978-5-9729-0200-2.

В связи с интенсивным развитием в последние годы промышленного производства изделий силовой электроники, стало возможным создание целой гаммы бесконтактных устройств, обеспечивающих запуск и торможение асинхронных электродвигателей в условиях значительного снижения негативных явлений, присущих использованию традиционной электромеханической аппаратуры. Как правило, прилагаемые руководства по эксплуатации содержат достаточные сведения для подключения, запуска и инициализации устройств, но для проведения надлежащего выбора их конфигурации и оценки функциональных возможностей применительно к конкретному применению, определения режима работы, анализа сбойных и аварийных ситуаций, диагностики и ремонта — этой информации недостаточно. Пособие призвано, в определенной мере, восполнить дефицит регулярной и интегрированной информации по сложившемуся направлению в приводной технике, особенно для той прослойки специалистов, которые заняты проектированием электрооборудования технологических комплексов, техническим обслуживанием и ремонтом действующего оборудования. Немалая часть книги посвящена описанию принципов работы бесконтактных устройств от простейших коммутаторов нагрузки до достаточно сложных интеллектуальных устройств плавного пуска. Подробно затронуты вопросы применения в промышленном оборудовании и коммунальной сфере, включая методику выбора и оценки эффективности использования. Пособие может быть использовано студентами технических университетов при курсовом и дипломном проектировании, а также специалистами электротехнического профиля эксплуатационных служб предприятий различных отраслей промышленности.

Кравцов, А. Электрические измерения : учеб. пособие / А. Кравцов, А. Пузарин. — М. : РИОР, Инфра-М, 2018. — 148 с. — ISBN 978-5-369-01736-4, 978-5-16-013519-9.

Учебное пособие написано в соответствии с программой одноименной дисциплины для студентов бакалавриата энергетических факультетов аграрных вузов. Изложены основы метрологии, рассмотрена современная терминология и классификации методов и средств измерений, электрических и не электрических величин. Приведены сведения об устройстве, принципах действия, особенностях применения измерительных приборов и преобразователей, методы и теория электрических средств измерений в агропромышленном производстве. Материал представлен с учетом новейших достижений и тенденций развития теории измерений и измерительной техники. Может быть использовано инженерно-техническими специалистами агропромышленного комплекса.

К ВОПРОСУ О МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗДУХА В СИСТЕМАХ ВЕНТИЛЯЦИИ ЗДАНИЙ

Рассмотрены основные зависимости, описывающие взаимосвязь потерь давления и расхода воздуха в системах вентиляции зданий при математическом моделировании их воздушного режима. Предложены формулы, позволяющие с более высокой точностью учитывать характеристики вентиляторов, приточных, вытяжных клапанов и других элементов аэродинамической сети систем вентиляции. Проведена оценка влияния на результаты математического моделирования способа задания зависимости расхода воздуха от перепада давлений.

Ключевые слова: вентиляция, математическое моделирование, потери давления, характеристики сопротивлений.

Математическое моделирование распределения потоков воздуха в системах вентиляции зданий является одним из основных методов прогнозирования их воздушного режима.

Известен ряд работ, посвященных исследованию различных аспектов данного вопроса [1–10].

В общем случае постановка задачи сводится к представлению системы вентиляции здания в виде аэродинамической сети, состоящей из узлов (блоков), соединенных между собой связями, характеризующими сопротивление ограждающих конструкций, вентиляционных каналов, приточных или вытяжных решеток, клапанов и др. элементов. В узлах, под воздействием перепада давлений, поступает и удаляется определенное количество воздуха. При этом воздушный баланс каждого из узлов считается нулевым (количество поступившего воздуха равно ушедшему).

Движение воздуха по отдельным участкам аэродинамической сети принято описывать нелинейными уравнениями, отражающими взаимосвязь между перепадом давлений и расходом воздуха. Например, для вентиляционных каналов в большинстве работ применялась зависимость [1–9]

$$\Delta P_i = s_i \cdot G_i^2, \quad (1)$$

где ΔP_i — общая потеря давления на участке, Па¹; G_i — массовый расход воздуха на участке, кг/ч; s_i — характеристика аэродинамического сопротивления участка, Па·ч²/кг².

Для описания взаимосвязи движения воздуха через оконные блоки в ряде работ [2–4] использовалось выражение типа

$$\Delta P_i = s_1 \cdot G_i + s_2 \cdot G_i^2 \quad (2)$$

или [7–9]

$$\Delta P_i = s_i \cdot G_i^\beta, \quad (3)$$

где β — показатель степени, принимаемый в зависимости от режима течения воздуха через тот или иной элемент.

Задача моделирования воздухораспределения в системах вентиляции зданий сводится к составлению системы нелинейных уравнений типа (1)–(3) или их аналогов — по расчетной схеме системы вентиляции, и последующему решению системы уравнений с использованием различных математических методов. Известные методы — Ньютона, Зейделя, обобщенного приведенного градиента и др. [3–5]. Критериями решения являются допустимые невязки расходов воздуха, подходящих и уходящих от узлов, и перепады давлений в каждом независимом контуре схемы.

Сложность реализации изложенного подхода обусловлена тем, что перемещение воздуха через отдельные элементы рассматриваемой аэродинамической сети характеризуется разным режимом течения. Соответственно, для корректного описания зависимости между перепадом давления и расходом воздуха необходимо в каждом конкретном воздухопроницаемом элементе задавать математическую зависимость «давление — расход воздуха», определять величины характеристик сопротивлений s_i и показателей степени. Именно этим обусловлено применение различных формул, в той или иной мере уточняющих аппроксимацию зависимости «давление — расход воздуха».

При включении в аэродинамическую сеть вытяжных (или приточных) вентиляторов, появляется необходимость учета дополнительного давления $P_{\text{вент}}$, создаваемого вентиляторами на отдельных участках сети.

Например, уравнение (2) для i -го участка с вентилятором приобретает вид [2, 3]

$$\Delta P_i = s_1 \cdot G_i + s_2 \cdot G_i^2 - P_{\text{вент}}, \quad (4)$$

Вентилятор в данном случае рассматривается как источник давления, а не новый узел сети.

В работе [3] уравнение, описывающее работу вентилятора, предлагалось записывать в виде

$$P_{\text{вент}} = P_0 - s_1 \cdot (G_i / \rho) - s_2 \cdot (G_i / \rho)^2, \quad (5)$$

где P_0 — давление вентилятора при нулевом расходе, Па;

ρ — плотность воздуха, кг/м³;

G_i — массовый расход воздуха, кг/ч;

(G_i / ρ) — объемный расход воздуха, м³/ч.

Соответственно, появляется задача определения и аппроксимации рабочих характеристик вентилятора $P_{\text{вент}} = f(G)$ с последующим включением их в систему нелинейных уравнений.

На рис. 1 в качестве примера приведены характеристики некоторых вытяжных вентиляторов (по данным заводов-изготовителей). Следует отметить, что зависимости «давление — расход воздуха» для разных типов вентиляторов могут существенно отличаться и иметь различную форму (например, седловидную).

В современных системах вентиляции с применением приточных и вытяжных клапанов, изменяющих свои характеристики в зависимости от степени открытия регулирующей заслонки или положения ветрозащитной планки, задача моделирования воздушного режима зданий осложняется еще и необходимостью составления уравнений «давление — расход воздуха» для этих устройств, что в ряде случаев требует задания характеристик с переломными точками.

В качестве примера на рис. 2 приведены результаты испытаний оконного клапана VentAir с ветрозащитной планкой и варианты аппроксимации зависимости «давление — расход воздуха» по различным формулам (табл. 1).

Следует отметить, что при расчете систем вентиляции с использованием ЭВМ в формулах (1) — (5) требовалось введение абсолютной величины G_i (по модулю). В результате вышеописанные формулы приобретали следующий вид:

$$\Delta P_i = s_{i1} \cdot |G_i| \cdot G_i; \quad (6)$$

$$\Delta P_i = s_{i1} \cdot G_i + s_{i2} \cdot |G_i| \cdot G_i; \quad (7)$$

$$\Delta P_i = s_{i1} \cdot |G_i^{\beta-1}| \cdot G_i. \quad (8)$$

Введение модуля G_i указывало на то, что при отрицательных значениях расхода воздуха (случай, когда направление движения противоположно заданному) движение воздуха будет определяться аналогичной зависимостью. В некоторых элементах аэродинамической сети (например, движении воздуха по вентиляционным каналам) данное условие справедливо, однако в ряде случаев при изменении направления движения воздуха зависимость может изменяться. Простейший пример — обратный клапан, который при движении воздуха в обратном направлении закрывается и при любых перепадах давлений расход воздуха близок к нулю. Соответственно, для полного описания работы элемента сети необходимо вводить в расчет несколько формул (одну в области отрицательных расходов, другую — в области положительных).

Расширение возможностей современных ЭВМ и совершенствование стандартных программных продуктов позволяет упростить подход к формированию систем нелинейных уравнений, обеспечить более точное и универсальное описание зависимостей «расход воздуха — потери давления».

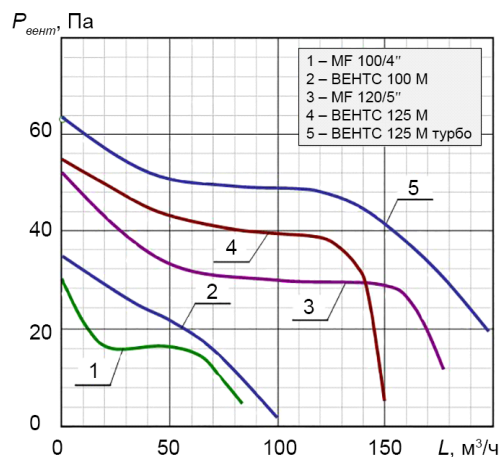


Рис. 1. Характеристики некоторых индивидуальных вентиляторов (по данным заводов-изготовителей)

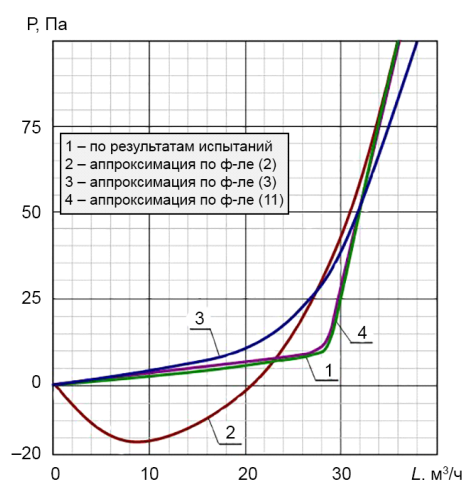


Рис. 2. Результаты испытаний и аппроксимация зависимости «давление-расход воздуха» по различным формулам для оконного клапана VentAir, полученные:

- 1 — по результатам испытаний;
- 2 — аппроксимацией по формуле (2);
- 3 — аппроксимацией по формуле (3);
- 4 — аппроксимацией по формуле (11) при степени аппроксимации $k = 6$

Для этого предлагается использовать известную зависимость в виде алгебраического многочлена [5]

$$f_i(x_i) = s'_{i1} \cdot x_i + s'_{i2} \cdot x_i^2 + s'_{i3} \cdot x_i^3 \dots, \quad (9)$$

Применительно к рассматриваемой задаче для i -го элемента вентиляционной сети можно записать

$$\Delta P_i = s_{i,1} \cdot G_i + s_{i,2} \cdot G_i^2 + s_{i,3} \cdot G_i^3 + \dots + s_{i,k} \cdot G_i^k \quad (10)$$

или в общем виде

$$\Delta P_i = \sum_{j=1}^k (s_{ij} \cdot G_i^j). \quad (11)$$

В данном случае нет необходимости во введении модуля, так как аппроксимирующая функция позволяет описать значения расходов, находящиеся как в положительной, так и в отрицательной областях (за исключением вентиляционных каналов и воздуховодов, для которых следует пользоваться формулой (6)).

Таблица 1

Значения расходов воздуха и потерь давления,
полученных по результатам испытаний $P_{исп}$
и аппроксимацией
по различным формулам

$L_{исп}, \text{ м}^3/\text{ч}$	$P_{исп}, \text{ Па}$	$P_{расч.(2)}, \text{ Па}$	$P_{расч.(3)}, \text{ Па}$	$P_{расч.(11)}, \text{ Па}$
0	0	0,00	0,00	0,00
10	3	-26,59	1,13	4,11
15	5	-24,29	4,39	4,22
25	10	11,47	24,15	10,62
27	12	23,61	31,21	17,40
29	25	37,42	39,6	27,09
32	50	61,25	54,99	47,64
35	75	88,81	74,13	75,61
37	100	109,27	89,22	98,20

Примечание: $P_{исп}$ — по результатам испытаний;
 $P_{расч.(2)}$ — аппроксимация по формуле (2);
 $P_{расч.(3)}$ — аппроксимация по формуле (3);
 $P_{расч.(11)}$ — аппроксимация по формуле (11).

Таблица 2

Значения расходов воздуха и потерь давления,
полученных по результатам испытаний $P_{исп}$
и аппроксимацией по различным формулам

$L_{исп}, \text{ м}^3/\text{ч}$	$P_{исп}, \text{ Па}$	$P_{расч.(5)}, \text{ Па}$	$P_{расч.(13)}, \text{ Па}$
0	30	30,00	30,00
10	21	26,35	21,07
15	18	24,59	17,99
20	16	22,87	16,01
30	15	19,57	14,84
50	16	13,47	16,22
60	15	10,67	15,19
70	13	8,05	12,32
80	8	5,59	8,36
90	4	3,31	4,23

Примечание: $P_{расч.(5)}$ — аппроксимация для кривой 2 по формуле (5);
 $P_{расч.(13)}$ — аппроксимация для кривой 3 по формуле (13).

Аналогичным образом предлагается описывать зависимость давления вентилятора от расхода, только в этом случае будет добавлен коэффициент s_0 , который соответствует максимальному давлению вентилятора:

$$P_{вент} = s_0 + s_1 \cdot G + s_2 \cdot G^2 + \dots + s_k \cdot G^k \quad (12)$$

или в общем виде

$$P_{вент} = s_0 + \sum_{j=1}^k (s_j \cdot G_j^j), \quad (13)$$

где s_0 — нулевой коэффициент, соответствующий максимальному давлению вентилятора.

Применение формулы (13) позволяет вводить характеристику вентиляторов как в области отрицательных расходов (II квадрант), так и в области отрицательных давлений (IV квадрант).

Необходимо отметить, что во всех вышеперечисленных формулах используется массовый расход воздуха G , измеряемый в кг/ч. Однако в ряде задач более удобным является использование объемного расхода воздуха L , измеряемого в $\text{м}^3/\text{ч}$ и необходимо

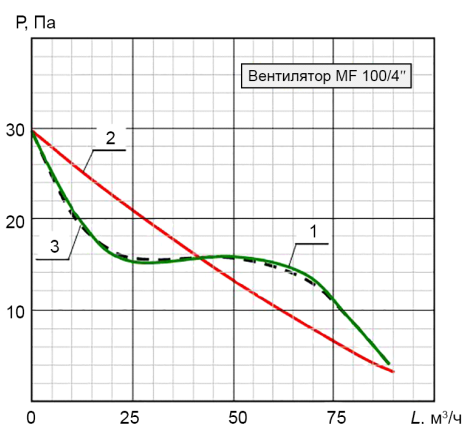


Рис. 3. Результаты испытаний и аппроксимация зависимости «давление–расход воздуха» по различным формулам вентилятора MF 100/4 фирмы Vortice:
 1 — результаты испытаний;
 2 — аппроксимация по формуле (5);
 3 — аппроксимация по предлагаемой формуле (13) при степени аппроксимации $k = 6$

Таблица 3

Результаты расчета воздухообмена
двухкомнатной квартиры верхнего этажа жилого дома
при аппроксимации $P_{\text{вент}}$ по различным формулам

Температура наружного воздуха, °C	$L_{\text{кв}}$, м³/ч, при аппроксимации $P_{\text{вент}}$		Погрешность, %
	по (5)	по (13)	
+21	109,2	121,4	11,2
+5	120,1	132,0	9,9
-20	138,8	147,9	6,6

Примечание: воздухообмен квартиры $L_{\text{кв}}$ рассчитан по суммарному расходу воздуха, удаляемого через вытяжные каналы

Таблица 4

Результаты экспериментальной проверки предложенных зависимостей в лабораторных условиях

Схема лабораторного стенда	№ участка	Расход удаляемого воздуха, м³/ч		Невязка, %
		по расчету	по замерам	
	1	35,5	31,7	10,7
	2	37,2	37,8	1,6
	3	43,5	43,6	0,2
	4	60,2	61,3	1,8
	Всего	176,4	174,4	1,1
	Примечания. 1. Замеры расходов воздуха выполнены с помощью анемометра «testo 417-2». 2. Температуре окружающего воздуха $t_{\text{в}} = 20 \pm 2$ °C. 3. Относительная влажность воздуха $\phi_{\text{в}} = 45 \pm 5$ %. 4. Проверочные расчеты проведены для вентиляционного канала аналогичных размеров, при аппроксимации зависимости «расход воздуха – давление» вентиляторов по формуле (13). 5. Суммарный расход воздуха по вентиляционному каналу определен сложением расходов воздуха (измеренных или рассчитанных) в каналах-спутниках.			

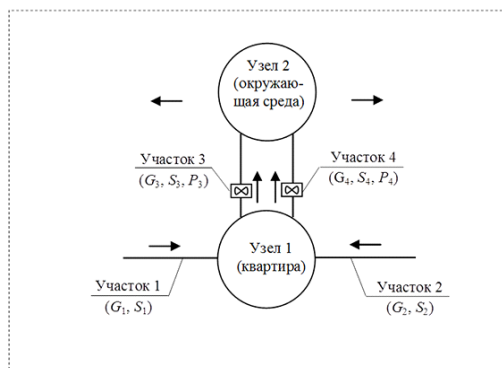
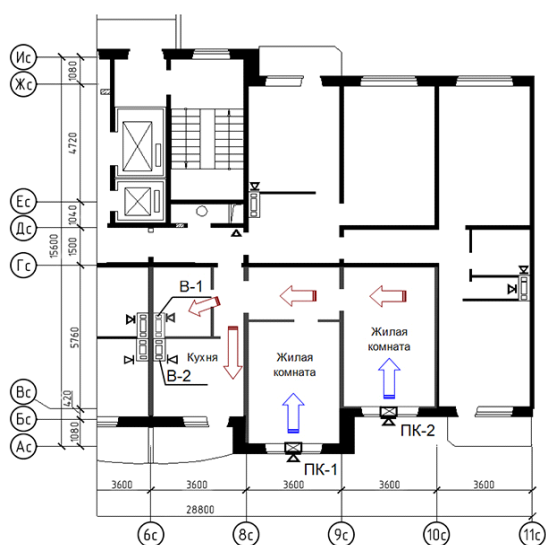


Рис. 4. Пример расчета воздухообмена двухкомнатной квартиры верхнего этажа многоквартирного жилого дома при аппроксимации $P_{\text{вент}}$ по различным формулам

учитывать, что в этом случае коэффициенты s_i будут другими.

Результаты аппроксимации зависимостей «расход воздуха — перепад давлений» по формулам (11) и (13) для некоторых вентиляционных элементов приведены на рис. 2, 3 (табл. 1, 2).

Предлагаемые уравнения за счет увеличения числа членов и показателей степени позволяют повысить точность расчетов.

В частности, описание характеристики приточных клапанов, полученное по формуле (11), ближе к фактической (рис. 2) по сравнению с кривыми, полученными по формулам (2, 3). Аналогичным образом могут отличаться и кривые, описывающие характеристики вентиляторов. В качестве примера на рис. 3 представлена характеристика вентилятора MF 100/4" фирмы Vortice.

В результате применения вышеописанных формул позволяет повысить точность расчета при моделировании воздушного режима здания.

На рис. 4 приведены расчетная схема и граф системы вентиляции двухкомнатной квартиры верхнего этажа многоквартирного здания с вытяжными вентиляторами и приточными клапанами. Результаты расчета этой системы при аппроксимации зависимости $P_{\text{вент}} = f(G)$ по формулам (5) и (13) представлены в табл. 3. Погрешность (расхождения в определении расходов воздуха) в приведенном примере составляет ~ 6–11 %.

Экспериментальная проверка корректности предложенных зависимостей выполнена на лабораторном стенде, моделирующем сборный вытяжной канал с каналами-спутниками, в которые встроены осевые вентиляторы.

Общая схема стенда приведена в табл. 4. Диаметр сборного канала — 150 мм, диаметр каналов-спутников — 100 мм. Количество каналов-спутников — 4. Марка использованных вентиляторов — «Домовент 100».

Замеры расходов воздуха выполнялись с помощью анемометра «testo 417-2».

Следует отметить, что до начала испытаний были определены фактические характеристики вентиляторов «P-L» в соответствии с ГОСТ 10921-90 [11].

Результаты испытаний в сопоставлении с результатами расчетов, выполненных при аппроксимации характеристик вентиляторов по формуле (13), приведены в табл. 4.

Заключение. Использование формул общего вида (11) и (13) обеспечивает универсальность подхода к аппроксимации зависимостей «расход воздуха — перепад давлений» для всех элементов аэродинамической сети и позволяет более точно определять рас-

ходы воздуха и потери давления при математическом моделировании воздушного режима здания.

Примечание

1. Условные обозначения, использованные в разных литературных источниках, в данной статье приведены к единому виду.

Библиографический список

1. Гинцбург Э. Я. Расчет отопительно-вентиляционных систем с помощью ЭВМ. М.: Стройиздат, 1979. 183 с.
2. Константинова В. Е. Расчеты воздухообмена в жилых общественных зданиях. М.: Стройиздат, 1964. 156 с.
3. Константинова В. Е. Воздушно-тепловой режим в жилых зданиях повышенной этажности. М.: Стройиздат, 1969. 136 с.
4. Светлов К. С. Расчет воздухообмена в многоэтажных зданиях с использованием электронно-вычислительных машин // Водоснабжение и санитарная техника. 1966. № 11. С. 28–31.
5. Меренков А. П., Хасилев В. Я. Теория гидравлических цепей. М.: Наука, 1985. 278 с.
6. Тертичник Е. И., Агаханова К. М. Расчет величин фактических потоков воздуха в вытяжной гравитационной системе с вертикальным сборным каналом // Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании: докл. Междунар. научн. конф. 16–17 ноября 2016 г. М., 2016. Ч. 2. С. 784-788.
7. Кривошеин А. Д., Андреев И. В. Исследование процессов распределения воздуха в гибридных системах вентиляции жилых зданий // Вестник СибАДИ. 2013. № 5 (33). С. 63-69.
8. Китайцева Е. Х. Обобщенные методы расчета воздушного режима здания и факторов, влияющих на качество внутреннего воздуха: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1995. 18 с.
9. Бирюков С. В. Разработка метода определения нормы потребления тепловой энергии системами отопления и вентиляции общественных зданий: На примере учебных корпусов вузов: дис. ... канд. техн. наук. М., 2002. 198 с.
10. Бороздин Е. Г. Математическое описание работы вентиляторов в составе механических приточных устройств // Вестник СибАДИ. 2015. № 4 (44). С. 115–119.
11. ГОСТ 10921-90. Вентиляторы радиальные и осевые. Методы аэродинамических испытаний. Введ. 1992-01-01. М.: Госстандарт, 1992. 35 с. URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-10921-90> (дата обращения: 02.10.2017).

КРИВОШЕИН Михаил Александрович, сотрудник кафедры «Теплоэнергетика».

Адрес для переписки: 22kma@mail.ru

Статья поступила в редакцию 02.10.2017 г.

© М. А. Кривошеин

ИССЛЕДОВАНИЕ СНИЖЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА НЕСИММЕТРИИ НАПРЯЖЕНИЯ ПО ОБРАТНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ С ПОМОЩЬЮ СИММЕТРИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ТРАНСФОРМАТОРНОГО ТИПА

Данная научная статья посвящена вопросам качества электроэнергии, причины и последствия возникновения несимметрии напряжений в системах электроснабжения литейного производства. В статье описаны основной метод расчёта и способ снижения коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности с помощью симметрирующих устройств трансформаторного типа. В заключении отмечено то, что на данный момент проблема качества электроэнергетики является весьма глобальной проблемой в России и в мире и требует незамедлительного решения, так как распределительные сети характеризуются значительной несимметрией напряжений. Это является одной из основных причин снижения качества электрической энергии и увеличения потерь мощности в сети.

Ключевые слова: качество электроэнергии, коэффициент несимметрии напряжения, симметрирующее устройство, несимметрия.

В настоящее время каждое промышленное предприятие находится в состоянии постоянного развития. Наиболее распространенными для цеховых электрических сетей являются напряжения 380 В (трех- и четырехпроводные системы с заземленной нейтралью) и 660 В. Несимметрия напряжений является одним из основных показателей качества, в значительной мере определяющим экономичность и надежность электроснабжения [1, 2].

Несимметричные режимы характеризуются наличием составляющих токов и напряжений обратной и нулевой последовательностей, которые приводят к следующим неблагоприятным последствиям:

- появляется опасность перегрузки трехфазных электрических двигателей токами обратной последовательности;
- появляются дополнительные потери активной мощности и электрической энергии;
- за счет потерь напряжения от токов обратной и нулевой последовательностей появляются дополнительные отклонения напряжения в отдельных фазах СЭС [1, 3].

Основными причинами возникновения несимметрии в электрической системе, практически во всех случаях, является неравномерность распределения нагрузок по фазам и снижение нагрузок трёхфазных потребителей (электродвигателей, мощных трехфазных нагревателей). На рис. 1 приведены основные последствия несимметрии напряжения в системах электроснабжения.

Для анализа и расчетов несимметричных режимов в трехфазных цепях в основном применяется метод симметричных составляющих. Метод симметричных составляющих основан на представлении любой трехфазной несимметричной системы величин (токов, напряжений, магнитных потоков) в виде суммы в общем случае трех симметричных систем величин. Симметричные составляющие отличаются друг от друга порядком следования фаз, то есть порядком, в котором фазные величины проходят через максимум и называются системами прямой, обратной и нулевой последовательностей [4].

Несимметрия междуфазных напряжений вызывается наличием составляющих обратной последова-



Рис. 1. Последствия несимметрии напряжений

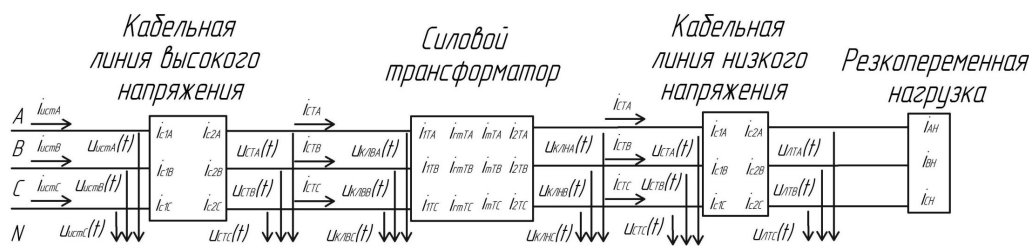


Рис. 2. Структурная схема объекта исследования

тельности, а несимметрия фазных еще и наличием составляющих нулевой последовательности.

Объектом исследования является литейное производство, в котором литейные установки конструктивно подключены на две фазы, вызывая при этом поперечную несимметрию. Ранние исследования по проблеме качества электроэнергии на данном объекте приводятся в работах [5–7].

Согласно ГОСТа 32144–2013 несимметрия напряжения характеризуется коэффициентом несимметрии напряжения по обратной последовательности K_{2U} , который является одним из показателей качества электрической энергии (КЭ) и рассчитывается по формуле [5–8]:

$$K_{2U} = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6 \cdot \beta}}{1 + \sqrt{3 - 6 \cdot \beta}}} \cdot 100, \quad (1)$$

где $\beta = \frac{U_{12fund}^4 + U_{23fund}^4 + U_{31fund}^4}{(U_{12fund}^2 + U_{23fund}^2 + U_{31fund}^2)^2}$, в свою очередь,

U_{ijfund} — основная составляющая напряжения между фазами i и j .

Для указанного показателя КЭ установлены следующие нормы:

- значение коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} в точке передачи электрической энергии, усредненные в интервале времени 10 мин, не должны превышать 2 % в течение 95 % времени интервала в одну неделю;

- значения коэффициентов несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} в точке передачи электрической энергии, усредненные в интервале времени 10 мин, не должны превышать 4 % в течение 100 % времени интервала в одну неделю [5].

Предлагается разработать математическую модель объекта исследования (рис. 2), на основании которой разработана её графическая интерпретация

(рис. 3). Данный объект из источника питания напряжением 10 кВ, силового понижающего трансформатора ТМЗ 1000-10/0,4, четырех линейных трансформаторов ОЭСК 250/40, четырех установок электрошлакового литья с дуговым способом нагрева, работающие при напряжении 40 В, каждая мощностью 170 кВ·А.

Значения коэффициентов несимметрии напряжения по обратной последовательности выходят за пределы нормально и предельно допустимых, а следовательно, наблюдается несоответствие ГОСТ 32144-2013 по данному показателю качества электроэнергии [2].

Одним из способов снижения несимметрии напряжения по обратной последовательности является выравнивание нагрузок по фазам. Техническим решением данного способа является введение симметрирующего устройства трансформаторного типа.

На рис. 4 приведена схема для симметрирования нагрузки переменного типа. Производится с помощью изменения величины конденсатора или катушки индуктивности. Схема характеризуется достаточно высоким cosφ [9].

Исследования показали, что симметрирующее устройство, состоящее из автотрансформаторов, катушки индуктивности и конденсатора, позволяет снизить коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности. Необходимо варьируя значения конденсаторов от 10^{-7} до 10^{-9} Ф, можно подобрать конечные значения, при которых значение K_{2U} станет в пределах, нормируемых ГОСТ 32144-3013.

В дальнейших исследованиях необходимо составлять алгоритмы и блок-схемы для управления симметрирующим устройством трансформаторного типа.

Подводя итог, скажем, что несимметрия напряжения, на данный момент, является очень серьезной проблемой энергетики и имеет много методов снижения до нормальных и предельных значений согласно ГОСТу. Каждый из них имеет свои положительные

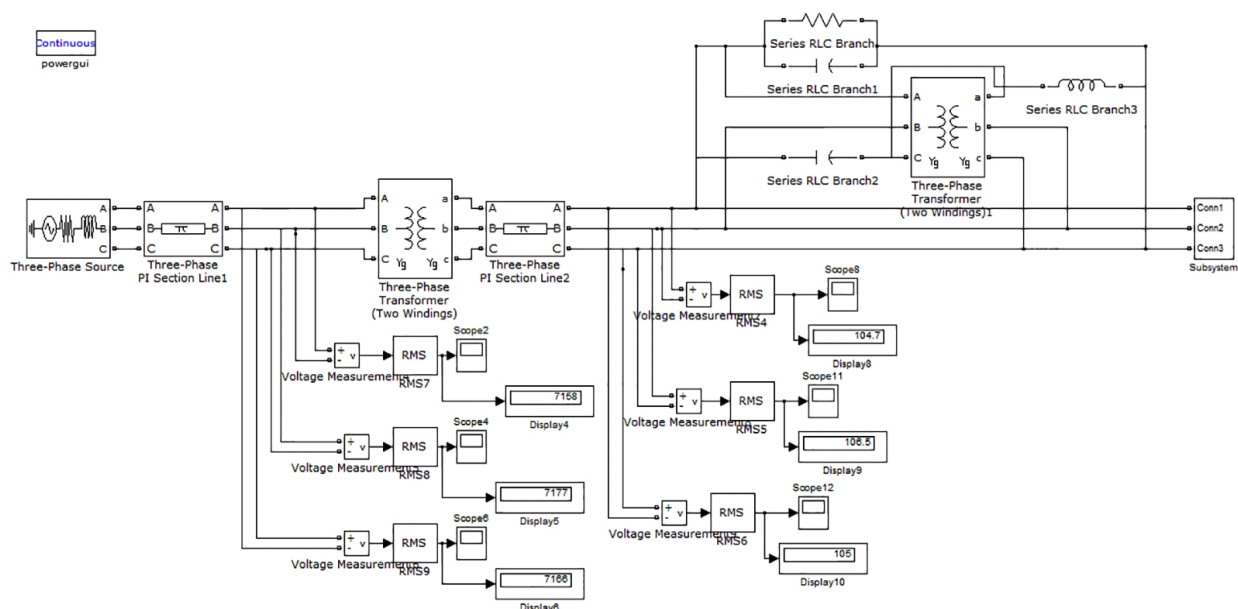


Рис. 3. Графическая интерпретация объекта исследования с симметрирующим устройством

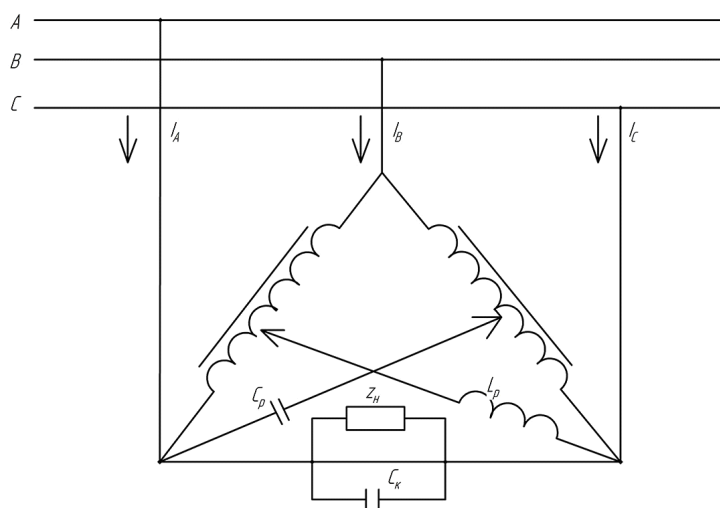


Рис. 4. Схема симметрирующего устройства с автотрансформатором, индуктивностью и емкостью

и отрицательные моменты как в экономическом, так и в техническом плане [10]. В дальнейшем необходима разработка новых методов устранения несимметрии, сочетающих в себе оба фактора.

Библиографический список

1. Руди Д. Ю., Ткачук Н. А. Негативное влияние несимметрии и методы их устранения в системе электроснабжения // Теория и практика современной науки: сб. науч. тр. по материалам XX Междунар. науч.-практ. конф. М., 2017. С. 87–91.
2. ГОСТ 32144-2013. Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения (взамен ГОСТ 13109-97). Введ. 2014-07-01. М.: Стандартиформ, 2014. 20 с.
3. Дрехслер Р. Измерение и оценка качества электроэнергии при несимметричной и нелинейной нагрузке. М.: Энергоатомиздат, 1985. 112 с.
4. Соловьёв С. В. Разработка методики расчёта общего случая несимметрии в системах электроснабжения и обеспечение надёжной работы электроустановок при нарушениях качества электрической энергии: дис. ... канд. тех. наук. М., 2011. 165 с.
5. Антонов А. И., Зозуля Е. Ю., Руди Д. Ю. Исследование зависимости коэффициентов несимметрии напряжения по обратной последовательности от мощности силового трансформатора // WORLD SCIENCE: PROBLEMS AND INNOVATIONS: сб. ст. победителей VI Междунар. науч.-практ. конф.: в 2 ч. Пенза, 2016. Ч. 1. С. 80–85.
6. Антонов А. И., Зозуля Е. Ю., Руди Д. Ю. Регулирование значений коэффициентов несимметрии напряжения по обратной последовательности с помощью межфазных переменных сопротивлений // Инновационные технологии в науке и образовании: сб. ст. победителей IV Междунар. науч.-практ. конф.: в 3 ч. Пенза, 2017. Ч. 1. С. 94–101.
7. Беляков В. Е., Егоров Е. А., Данильченко А. Р. Моделирование системы электроснабжения плавильного цеха ОАО «Релеро» в Matlab // Евразийский союз ученых. 2015. № 10-2 (19). С. 25–29.
8. Антонов А. И., Вишнягов М. Г., Денчик Ю. М., Зубанов Д. А., Клеутин В. И., Руппель А. А. Определение кондуктивной низкочастотной помехи по коэффициенту несимметрии напряжения по обратной последовательности // Научные проблемы Сибири и Дальнего Востока. Новосибирск: СГУВТ. 2015. № 4. С. 199–203.
9. Сидоров С. А. Регулируемое симметрирующее устройство с индуктивным накопительным элементом: дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 2015. 143 с.

10. Слободянюк М. А. Определение области допустимых несимметричных режимов в системах электроснабжения до 1 кВ: дис. ...канд. техн. наук. М., 2003. 168 с.

РУДИ Дмитрий Юрьевич, ассистент кафедры «Электротехника и электрооборудование» Омского института водного транспорта (ОИВТ) (филиал) Сибирского государственного университета водного транспорта (СГУВТ).

АНТОНОВ Александр Игоревич, старший преподаватель кафедры «Электротехника и электрооборудование» ОИВТ (филиал) СГУВТ.

РУППЕЛЬ Александр Александрович, кандидат технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры «Электротехника и электрооборудование» ОИВТ (филиал) СГУВТ.

РУППЕЛЬ Елена Юрьевна, доцент (Россия), доцент кафедры «Высшая математика» Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета, г. Омск.

Адрес для переписки: dima_rudi@mail.ru

Статья поступила в редакцию 28.09.2017 г.

© Д. Ю. Руди, А. И. Антонов, А. А. Руппель, Е. Ю. Руппель

УДК 621.928.99

Л. В. БЕЛОГЛАЗОВА

Омский государственный
технический университет,
г. Омск

ВЕРИФИКАЦИЯ И АНАЛИЗ МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ ЗАПЫЛЕННОГО ПОТОКА В ИНЕРЦИОННО-ВАКУУМНОМ ЗОЛОУЛОВИТЕЛЕ

Целью статьи является анализ движения запыленного потока в проточной части золоулавливающего аппарата ИВЗ (инерционно-вакуумный золоуловитель). Основными задачами, поставленными перед автором, были проведение численного эксперимента в ANSYS CFX при различных граничных условиях и выбор наиболее реалистичного отображения динамики движения потока в них с последующим комментированием происходящих физических процессов в каждом. Результатом написания статьи стали обоснованные выводы и заключения по четырем парам граничных условий, что может быть полезным для проведения численных экспериментов последующими исследователями движения запыленного потока.

Ключевые слова: золоуловитель, запыленный поток, ИВЗ, верификация.

Работа выполнена при финансовой поддержке фонда «Энергия без границ», НИР № 15001 «Разработка, авторский надзор за монтажом и участие в испытаниях полномасштабного инерционно-вакуумного золоуловителя».

Инерционно-вакуумный золоуловитель (ИВЗ) — это аппарат, предназначенный для эффективного пылеудаления из потока уходящих газов на тепловых электростанциях. Тема золоулавливания [1] крайне актуальна, что подтверждается упоминанием этой проблемы в энергетических стратегических программах РФ [2, 3], а в ОмГТУ ведется научно-исследовательская работа № 17030В, основная цель которой — исследование ИВЗ.

История развития конструкции аппарата основана на материалах разработчиков конструкций золоуловителей инерционного типа. Принцип работы ИВА особенен тем, что аппарат работает под разрежением, следовательно, необходима полная герметизация аппарата. На рис. 1 представлена схема работы инерционно-вакуумного аэрофилтра. ИВА — первый вид золоуловителя, основанный на инерционно-вакуумном принципе улавливания час-

тиц. Эта конструкция послужила одной из первых отправных точек по развитию золоулавливающих установок этого типа [4].

Принципиальными отличиями новой конструкции от старой являются: увеличение высоты рассекателя; выравнивание стены участка 2, что уменьшило перепад давления, необходимый для стабилизации работы дымососа; выравнивание участка Д, отвечающего за постепенную реламинизацию потока.

Поток уходящих газов (рис. 2) заходит во входной патрубок 1, благодаря рассекателю 2 производится реламинизация потока. Поток движется вдоль рассекателя, а затем разворачивается на 360° и перемещается за счет разрежения, создаваемого дымососом, на выходной патрубок 7. Сам рассекающий 2 расположен на крестовине 5, которая помогает удерживать статично рассекающий 2 и кольца 4.

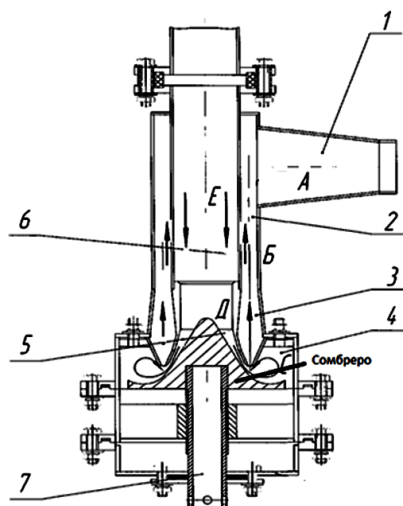


Рис. 1. Схема работы ИВА:

- 1 — выходной канал чистого воздуха;
2 — азроканал подвода воздуха; 3 — разгонное сопло;
4 — поворотная камера;
5 — патрубок входа загрязненного газа;
6 — входной патрубок, 7 — ось

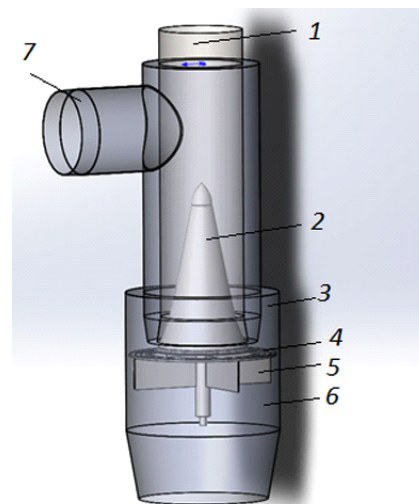


Рис. 2. ИВЗ:

- 1 — входной патрубок, 2 — рассекатель, 3 — «уши»,
4 — кольца, 5 — крестовина, 6 — бункер,
7 — выходной патрубок

Из-за создаваемого движения газов в областях «уши» 3 и бункере 6 создается небольшое разрежение, благодаря которому производится подсос частиц. Через «уши» 3 частицы подсасываются и теряют кинетическую энергию, которую они набрали при повороте, и далее ссыпаются за счет силы тяжести в бункер 6. Более тяжелые частицы ударяются о кольца 4 и так же теряют свою энергию либо проскальзывают в межкольцевое пространство, где их подсасывает разрежение в бункере 6.

Принцип работы установки заключается в реламинизации входящего запыленного потока [5], развороте его на 180° и в подсосе золы в области разрежения, такие как «уши» и бункер. При расчете с помощью численного эксперимента [6] выявлено, что аэродинамическое сопротивление установки — 660 Па, наибольшая скорость, развиваемая в установке, — 69 м/с, эффективность установки достигает 99 % [7]. Разработка установки началась в 2009 году [8]. На нее имеются патенты [9–10]. Первый полупромышленный образец был испытан в 2009 году с помощью магистров ОмГТУ, в ходе которого были приняты во внимание особенности поведения потока и сконструирована новая установка после проведения численных экспериментов. ИВЗ разрабатывался при финансовой поддержке ИНТЕР РАО «ЕЭС» из фонда «Энергия без границ».

Для модернизации полупромышленного образца ИВЗ и испытаний в наиболее оптимальных режимах работы необходимо было провести математические расчеты. В гидрогазодинамике [11] эти расчеты описываются системой уравнений Навье — Стокса. А ANSYS CFX [12] в ходе моделирования процесса использует к-ε (к — кинетическая энергия, ε — диссипация) модель. Уравнение движения преобразуется к виду, в котором добавлено влияние флуктуации средней скорости (в виде турбулентной кинетической энергии) и процесса уменьшения этой флуктуации за счёт вязкости (диссипации). Математическая модель течения [13] среды имеет вид:

уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial z} = 0,$$

уравнения движения:

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} + \rho \omega \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{\Sigma} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{\Sigma} \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_{\Sigma} \frac{\partial u}{\partial z} \right),$$

$$\rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} + \rho \omega \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{\Sigma} \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{\Sigma} \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_{\Sigma} \frac{\partial v}{\partial z} \right),$$

$$\rho u \frac{\partial \omega}{\partial x} + \rho v \frac{\partial \omega}{\partial y} + \rho \omega \frac{\partial \omega}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{\Sigma} \frac{\partial \omega}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{\Sigma} \frac{\partial \omega}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_{\Sigma} \frac{\partial \omega}{\partial z} \right)$$

уравнения к-ε модели:

$$\rho u \frac{\partial}{\partial x} (k) + \rho v \frac{\partial}{\partial y} (k) + \rho \omega \frac{\partial}{\partial z} (k) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_t \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_t \frac{\partial k}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_t \frac{\partial k}{\partial z} \right) + \mu_t D - \rho \epsilon,$$

$$\rho u \frac{\partial}{\partial x} (\epsilon) + \rho v \frac{\partial}{\partial y} (\epsilon) + \rho \omega \frac{\partial}{\partial z} (\epsilon) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_{\epsilon}} \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_{\epsilon}} \frac{\partial \epsilon}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_{\epsilon}} \frac{\partial \epsilon}{\partial z} \right) + C_{1\epsilon} \mu_t \frac{\epsilon}{k} D - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k};$$

уравнение для эффективной и суммарной вязкости:

$$\mu_{\Sigma} = \mu + \mu_t, \quad \mu_t = C_{\mu} \rho \frac{k^2}{\epsilon},$$

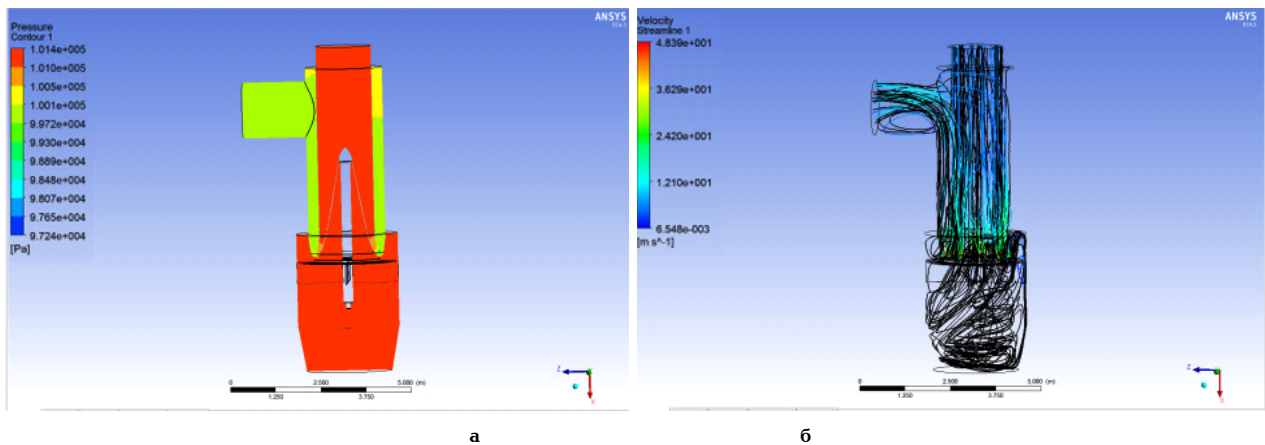


Рис. 3. ИВЗ, рассчитанный при граничных условиях, скорость на входе, давление на выходе: а — распределение давления; б — линии тока

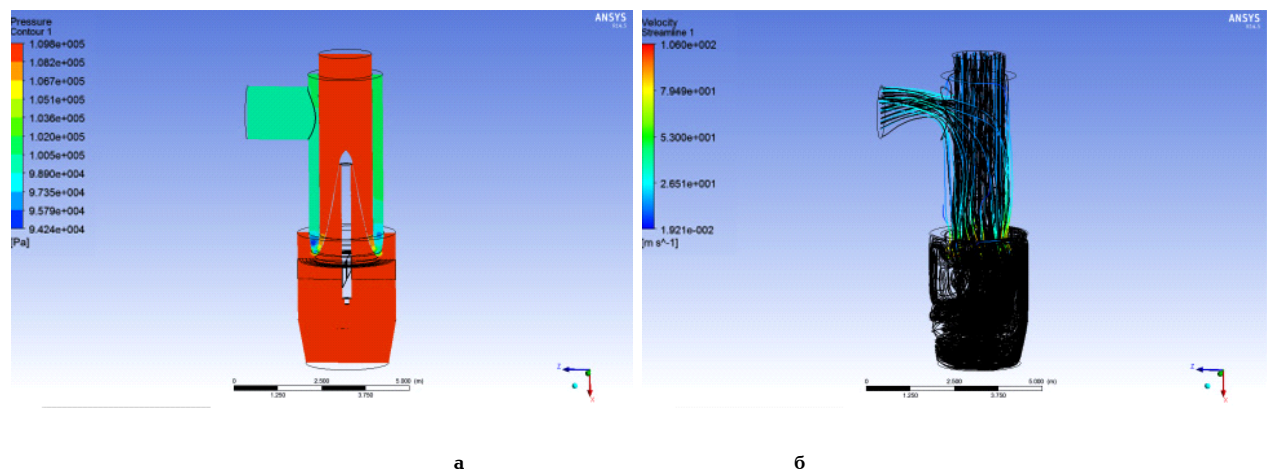


Рис. 4. ИВЗ, рассчитанный при граничных условиях, расход на входе, давление на выходе: а — распределение давления; б — линии тока

где ρ — заданная плотность воздуха ($\rho = \text{const}$); u , v , ω — проекции вектора скорости жидкости, p — давление в жидкости, μ — заданная физическая (ламинарная) вязкость ($\mu = \text{const}$); μ_t — турбулентная кинематическая вязкость; k — кинетическая энергия турбулентности, отнесённая к единице массы жидкости, ε — скорость диссипации в тепло кинетической энергии турбулентности в единице объёма жидкости; C_μ , $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, σ_ε — эмпирические константы k - ε модели.

Движение частиц описывается уравнением:

$$m_p \frac{dv_p}{dt} = F_{ali},$$

где $F_{ali} = F_D + F_B + F_R + F_{VM} + F_p + F_{BA}$, F_D — сила аэродинамического сопротивления; F_B — подъёмная сила; F_R — сила, обусловленная вращательным движением; F_{VM} — сила, обусловленная ускорением частицы относительно газа; F_p — сила, обусловленная градиентом давления; F_{BA} — сила Бассэта. В рамках данной работы сила Бассэта пренебрегается из-за того, что она не рассчитывается в Ansys CFX.

На рис. 3 численный эксперимент на ИВЗ велся при граничных условиях: скорость на входе 5,89 м/с, давление на выходе — 100000 Па. Дисперсный состав золы варьируется от 1 — 30 мкм во всех экспериментах. Скорость высчитана по формуле, в которой она

прямо пропорциональна объёмному расходу потока на входе и обратно пропорциональна площади входного сечения. Объёмный расход дымовых газов 150000 м³/ч, запыленность частицами потока во всех нижеперечисленных экспериментах указана как 70 г/м³. Перепад давления в результате расчета (изображенный на рис. 3а) показал 4160 Па либо 416 мм вод. ст. Исходя из фундаментального принципа работы установки, нельзя утверждать о корректности полученных результатов, т.к. под «сомбреро», в «ушах» должна быть область давления чуть ниже нежели во входном патрубке, что увеличивает эффективность установки. Максимальная скорость, развиваемая потоком в установке, — 48 м/с (отображается в левом верхнем углу на рис. 3б). Эффективность около 40 %. Возникают необъяснимые возвратные течения, которых в жизни быть не может.

На рис. 4 сохраняется тенденция некорректного способа улавливания частиц, что заставляет усомниться в выборе граничных условий (объёмный расход на входе — 150000 м³/ч, давление на выходе — 100000 Па). Максимальная скорость 106 м/с (рис. 4б) Перепад давления (рис. 4а) 15560 Па (1556 мм. вод. ст.). Эффективность улавливания в установке — 40%. Движение потока физично.

На рис. 5 реализуется корректный способ улавливания частиц, который подтвержден натурным

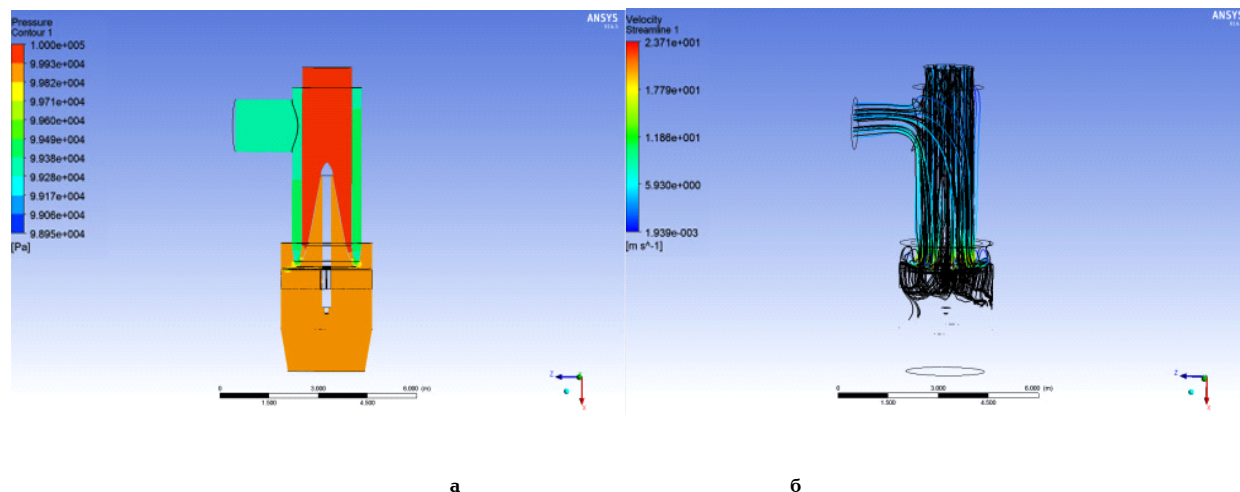


Рис. 5. ИВЗ, рассчитанный при граничных условиях, давление на входе, давление на выходе: а — распределение давления; б — линии тока

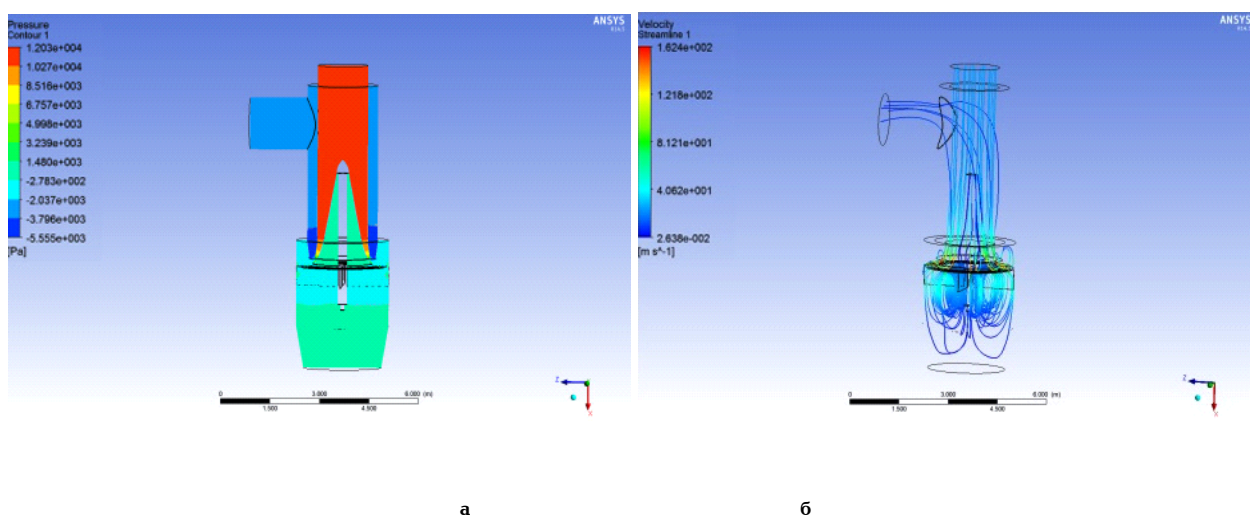


Рис. 6. ИВЗ, рассчитанный при граничных условиях, расход на входе, скорость на выходе: а — распределение давления; б — линии тока

экспериментом на установке с таким же способом улавливания (давление на входе — 100 000 Па, давление на выходе — 99000 Па). Максимальная скорость 106 м/с (на рис. 5б). Перепад давления (на рис. 5а) 1050 Па (105 мм вод. ст.). Эффективность улавливания в установке — 50 %. Движение потока физично, улетают в основном мелкие частицы. Движение частиц нарисовано таковым из-за малого отражения длины потока траектории частицы. Попадая в ловушку-бункер, частица уже не может выйти с очищенными газами, т.к. распределение давления в установке не позволяет допустить этого.

В опубликованных ранее научных трудах, посвященных исследованию инерционно-вакуумного золоуловителя нецилиндрической формы [14], были выбраны такие граничные условия, как на рис. 6. Однако проведение численного эксперимента на аппарате цилиндрической формы показало невозможность отображения движения частиц (рис. 6б), а распределение давления (рис. 6а) и вовсе показало, как оно ушло в минус, что не соответствует жизни.

В результате исследования пришли к выводу, что оптимальными граничными условиями для ИВЗ могут быть давление — давление, а низкая эффективность

идет за счет не совсем концентричного расположения «сомбреро» (что можно видеть из-за несимметричного распределения давлений по обоим бокам рассекателя) и участия в эксперименте частиц золы 1 — 5 мкм, что снижает эффективность установки.

Библиографический список

1. Юшин В. В., Лапин В. А., Попов В. М. [и др.]. Техника и технология защиты воздушной среды. М.: Высшая школа, 2005. 391 с. ISBN 5-06-004446-7.
2. Баринов В. А., Маневич А. С., Сапаров М. И. Программа модернизации электроэнергетики России на период до 2030 года «Технологическая модернизация электроэнергетики России» / ЭНИН «Энергетический институт им. Г. М. Кржижановского». М., 2011. URL: https://www.eriras.ru/files/manje-vich-programma_modjernizacii.pdf. (дата обращения: 10.09.2017).
3. Охрана окружающей среды: Государственная программа Российской Федерации; утв. постановлением Правительства Российской Федерации от 15.04.2014 № 326. URL: <http://www.mnr.gov.ru/regulatory/detail.php?ID=134258> (дата обращения: 12.09.2017).
4. Ветошкин А. Г. Процессы и аппараты пылеочистки. Пенза: Изд-во Пензенского гос. ун-та, 2005. 210 с.

5. Варахсин А. Ю. Турбулентные течения газа с твердыми частицами. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 512 с. ISBN5-9221-0320-2.
6. Чигарёв А. В., Кравчук А. С., Смалюк А. Ф. ANSYS для инженеров: справ. пособие. М.: Машиностроение-1, 2004. 391 с. ISBN 5-94275-048-3.
7. Белоглазов В. П., Белоглазова Л. В. Влияние высоты расщепителя на эффективность улавливания золы экибастузского угля в инерционно-вакуумном золоуловителе // Прикладная механика и техническая физика. 2014. Т. 55, № 2. С. 80–93.
8. Белоглазов В. П., Досалин Э. Х., Корсаков В. А. [и др.]. Инерционный способ очистки газов от взвешенных частиц на базе инерционно-вакуумного пылеуловителя // Динамика систем, механизмов и машин: материалы VII Междунар. науч.-техн. конф. 2010. № 2. С. 66–68.
9. Пат. 92358 Российская Федерация, МПК 7 В 01 Э 45/06. Инерционно-вакуумный пылеуловитель / Белоглазов В. П., Ченцов А. В. № 2009139047/22; заявл. 22.10.09; опубл. 20.11.09, Бюл. № 8.
10. Пат. 93298 Российская Федерация, МПК 7 В 01 Э 45/06. Пылеуловитель / Белоглазов В. П. № 2009144229/22; заявл. 30.11.09; опубл. 27.04.10, Бюл. № 12.
11. Горбис З. Р. Теплообмен и гидромеханика дисперсных сквозных потоков. М.: Энергия, 1970. 424 с.
12. Басов К. А. ANSYS в примерах и задачах. М.: КомпьютерПресс, 2002. 224 с.
13. Белоглазов В. П., Белоглазова Л. В. Влияние изменения высоты колец на эффективность инерционно-вакуумного золоуловителя // Омский научный вестник. 2016. № 1(145). С. 52–54.
14. Белоглазов В. П., Белоглазова Л. В. Входная скорость в ИВЗУ на степень улавливания золы экибастузского угля // Динамика систем, механизмов и машин. 2014. № 1. С. 187–190.

БЕЛОГЛАЗОВА Любовь Владимировна, аспирантка кафедры «Теплоэнергетика».

Адрес для переписки: teploblv@mail.ru

Статья поступила в редакцию 15.09.2017 г.

© Л. В. Белоглазова

Книжная полка

Шейпак, А. История науки и техники. Энергомашиностроение : учеб. пособие / А. Шейпак. – М. : Прометей. – 2017. – 254 с. – ISBN 978-5-906879-26-4.

Настоящая книга является продолжением серии учебных пособий по курсу «История науки и техники». Учебное пособие написано для направленной подготовки 121100 «Гидравлические машина, гидроприводы и гидропневмоавтоматика», 101100 «Двигатели внутреннего сгорания» и 101400 «Турбостроение». Если мы будем знать, как создавались новые орудия труда, новые материалы и новые машины, то сможем использовать эти знания в настоящем и будущем для обучения методам творчества.

Томаров, Г. Геотермальная энергетика. Справочно-методическое издание / Г. Томаров, А. Никольский, В. Семенов [и др.]. – М. : Интехэнерго-Издат, Теплоэнергетик, 2015. – 304 с. ISBN 978-5-98385-017-0.

В книге рассмотрены виды и запасы геотермальных ресурсов, физико-химические свойства одно- и двухфазных многокомпонентных геотермальных теплоносителей, научно-технические проблемы их использования в энергетике. Дан анализ развития геотермальных энерготехнологий в России и за рубежом. Изложены закономерности и процессы, лежащие в основе современной геотермальной энергетике. Рассмотрены технологические схемы и особенности преобразования энергии геотермального теплоносителя в электроэнергию. Представлены результаты российских научно-технических разработок в области геотермальной энергетике. Приведены сведения о конструкции и технических характеристиках оборудования отечественных геотермальных электростанций и систем теплоснабжения. Предложены пути повышения надежности и экономичности геотермального энергетического оборудования. Для научных и инженерно-технических работников, занимающихся исследованиями и проектированием геотермальных энергосистем и оборудования, персонала ГеоЭС, а также для аспирантов и студентов.

Фрей Д. Оценка экономической эффективности энергосбережения. Теория и практика / Д. Фрей, П. Костюченко, А. Зубкова [и др.]. – М. : Теплоэнергетик, 2015. – 400 с. ISBN 978-5-98385-016-3.

Основной причиной торможения деятельности по энергосбережению является недостаточная экономическая заинтересованность предприятий в ее развитии. Это связано, в том числе, с отсутствием методического обеспечения для эффективного планирования этой деятельности. Коллективом авторов была поставлена цель разработки инструментария, позволяющего предприятию на этапе планирования энергосберегающих проектов и программ оптимизировать экономические результаты энергосбережения и повышения энергоэффективности в рамках принятой им концепции стратегического развития. Методология разработанных алгоритмов основана на методах инвестиционного анализа, проектного управления и стратегического планирования.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ХАОТИЧЕСКОЙ НЕСУЩЕЙ ЧАСТОТЫ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИИ НА РАБОТУ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО АСИНХРОННОГО ПРИВОДА

Классическая широтно-импульсная модуляция (ШИМ) довольно хорошо изучена, в то время как многие детали, относящиеся к ШИМ с хаотической частотой, еще не были должным образом проанализированы с практической и теоретической точки зрения. Работа посвящена исследованию влияния хаотической несущей частоты широтно-импульсной модуляции на работу частотно-регулируемого асинхронного двигателя. В первой части исследования с помощью имитационной модели проведен анализ ШИМ с постоянной и хаотической несущей частотой. Во второй части проведено исследование на экспериментальной установке частотно-регулируемого асинхронного электродвигателя. Проведено сравнение энергетических показателей при использовании ШИМ с постоянной и хаотической несущей частотой. Используя хаотическую частоту несущую ШИМ, разработан метод уменьшения акустического шума. Измерены и проанализированы спектры выходного напряжения для классической ШИМ и ШИМ с хаотическим изменением несущей частоты.

Ключевые слова: широтно-импульсная модуляция, силовая электроника, преобразователи частоты, детерминированный хаос.

Введение. Благодаря технологическому прогрессу, силовые электронные преобразователи на основе полупроводниковых приборов сегодня используются в огромном количестве устройств. Не проводя классификацию устройств силовой электроники, можно с уверенностью сказать, что сегодня большая часть преобразователей основана на импульсной технологии. Это электронные балласты, электроприводы с регулируемой скоростью, сварочные аппараты, бесперебойные источники электропитания, электромотоциклы, тяговые приводы и т. д. Как показано в [1], такие силовые преобразователи управляются по принципу «включено-выключено». Несмотря на то, что сегодня набирают популярность преобразователи с мягким переключением, большинство преобразователей по-прежнему работают с жестким переключением. Как показано в [2], существуют разные методы управления выходной мощностью преобразователя, но самые распространенные основаны на широтно-импульсной модуляции. Это обеспечивает хорошую эффективность в широких пределах выходной мощности. Исходя из этого, можно сказать, что в будущем использование широтно-импульсной модуляции в силовых преобразователях будет продолжено. В связи с вышеизложенным, работа направлена на

исследование новой методики ШИМ в частотно-регулируемом асинхронном электроприводе. Эта так называемая ШИМ с хаотическим изменением несущей частоты, которая позволит устранить некоторые недостатки, появляющиеся при использовании классической ШИМ.

Итак, частотно-регулируемый асинхронный электропривод с преобразователем частоты (ПЧ) стал основным типом регулируемого электропривода [3]. Проблемами для таких приводов являются излучаемый акустический шум и риск возникновения механических резонансов. В работах [4, 5] исследованы эти явления. Существуют различные методы решения данных проблем. Один из способов уменьшения шума — использовать частоту коммутации выше 18 кГц, но при этом растут потери в электродвигателе и потери на переключении. Другим способом является фильтрация выходного напряжения, но это увеличивает размеры и стоимость преобразователя. Гораздо более перспективным методом является хаотическое изменение частоты переключения ШИМ [6]. В работе основной упор делается на стандартный трехфазный преобразователь напряжения, хотя такой подход может быть использован и в других приложениях силовой электроники.

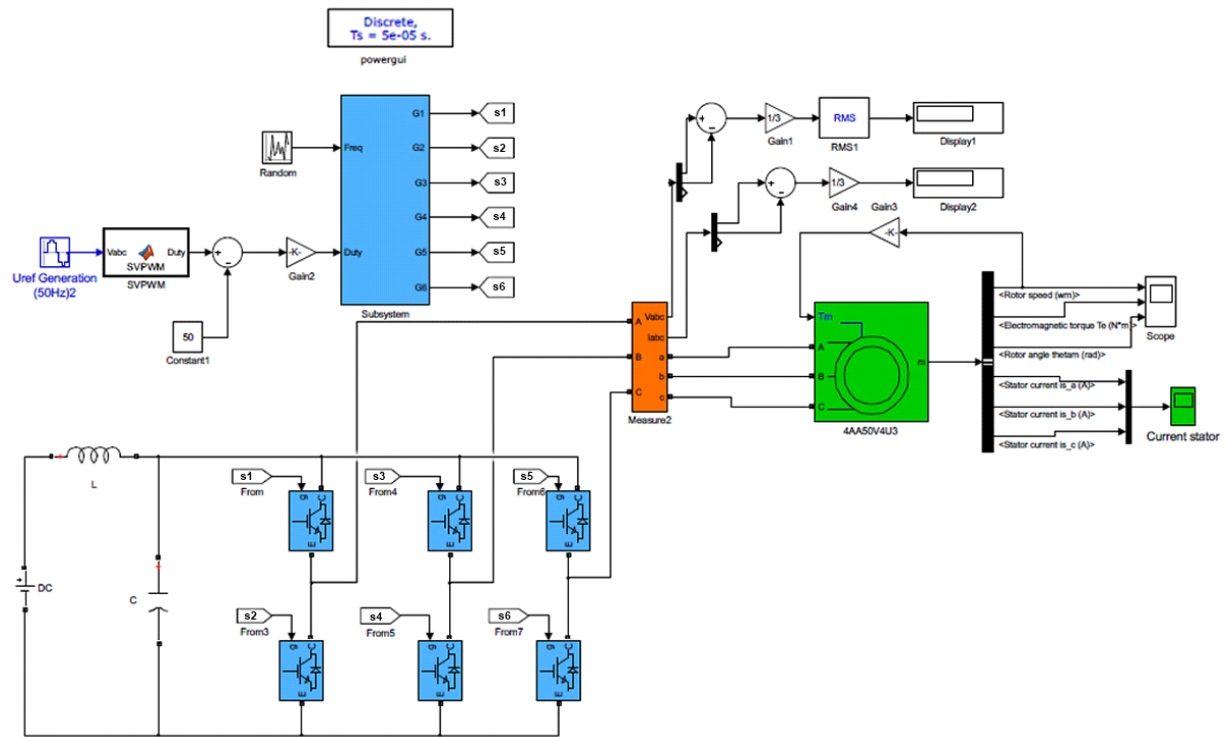


Рис. 1. Имитационная модель

Ранние исследования показали, что хорошо разработанная методика ШИМ с хаотической частотой ведет себя практически так же, как ее детерминированный аналог. Однако вследствие хаотических переключений силовых элементов спектры частотной области сильно отличаются от спектров классической ШИМ. По сути, спектр классической ШИМ состоит из дискретных частотных компонентов, сгруппированных вокруг кратных несущей частоты, тогда как спектр ШИМ с хаотической частотой имеет непрерывный спектр. Это свойство спектрального состава становится основополагающим к пониманию текущего интереса к ШИМ с хаотической частотой.

Теоретическая часть. Первая часть исследования посвящена разработке имитационной модели в пакете *MATLAB*, приложении *Simulink*, показанная на (рис. 1). Имитационная модель состоит из асинхронного двигателя, классической схемы инвертора напряжения на шести IGBT транзисторах, блока формирования векторного ШИМ (SVPWM), генератора детерминированного хаоса и системы управления, которая подробно рассмотрена в работе [6]. Для поддержания постоянного коэффициента заполнения необходимо иметь линейное возрастание и убывание треугольного сигнала несущей частоты. Отметим, что несущая частота всегда намного больше, чем частота модулирующих сигналов A_{ma} , A_{mb} , A_{mc} . В этом случае коэффициент заполнения ШИМ пропорционален модулирующему сигналу в течение одного периода несущей частоты. Таким образом, если наклон последующих сегментов треугольного сигнала изменяется, то сохраняется линейность. Покажем процесс формирования хаотического изменения несущей частоты.

Пусть мгновенное значение несущей частоты, т.е. частоты одного прямого отрезка, находится на интервале времени t_a и t_{a+1} , тогда частота f определяется выражением

$$f = \frac{1}{t_{a+1} - t_a} = \frac{1}{T_c + T_m}, \quad (1)$$

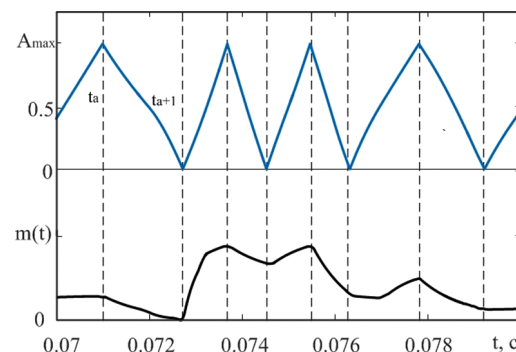


Рис. 2. Треугольный сигнал несущей частоты и хаотическая модулирующая функция

где T_c — постоянный период несущей частоты, T_m — период хаотического изменения сегментов треугольного сигнала несущей частоты. Откуда

$$T_m = k \cdot m(t), \quad (2)$$

где $m(t) = Ae^{-t} \cos 2\pi ft$ — автокорреляционный процесс, модулирующий функции, A — дисперсия несущей частоты, k — масштабный коэффициент.

На рис. 2 показан процесс хаотического изменения частоты ШИМ. Очевидно, что, ограничивая величину $m(t)$, можно поддерживать частоту ШИМ в пределах заданного уровня хаотического диапазона, тем самым ограничить спектр выходного напряжения. Оптимальным подходом для векторной ШИМ является хаотическое изменение наклона сегментов треугольного сигнала несущей частоты. Пусть модулирующая функция $m(t)$ является случайной функцией, например, гауссовым «белым» (широкополосным) шумом. В этом случае получается модуляция с очень широкой полосой пропускания, что приводит к большому мгновенному изменению несущей частоты треугольного сигнала. Это умень-

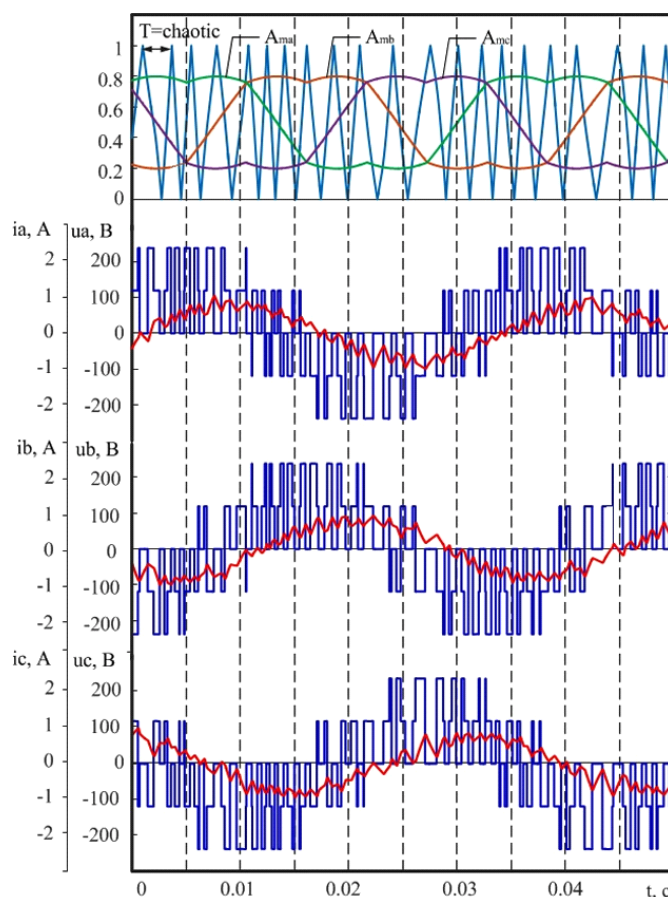


Рис. 3. Результаты моделирования

шает шум электродвигателя, а также приводит к очень широкому спектру выходного напряжения и тока. Поскольку несущая частота ШИМ является основным источником акустических шумов, более высокими частотными гармониками можно пренебречь.

На рис. 3 изображен процесс формирования фазных напряжений электродвигателя. ШИМ реализована с помощью блока SVPWM, формирующего трехфазные модулирующие сигналы A_{ma} , A_{mb} и A_{mc} , и однофазного генератора треугольного сигнала с хаотической несущей частотой. Модулирующие сигналы не синхронизированы с фазой несущей частоты. Путем сравнения амплитуд A_{ma} , A_{mb} и A_{mc} с треугольным сигналом возникают фазные напряжения u_a , u_b и u_c . Период несущей частоты определяется выражением (1). Таким образом, в фазном напряжении и токе помимо основной гармоники присутствуют еще и хаотически изменяющиеся гармоники, кратные частоте ШИМ.

Экспериментальная часть. Чтобы подтвердить правильность исследований на имитационной модели, была разработана лабораторная установка для снятия реальных спектров напряжения и тока асинхронного двигателя. На лабораторной установке (рис. 4) определение энергетических характеристик асинхронного двигателя производилось в соответствии с ГОСТ 25941-83. Использован метод взаимной нагрузки, при котором две машины механически соединяются друг с другом. Машина М1 работает в режиме двигателя (АД) от трехфазного источника, машина М2 — в режиме генератора (генератор постоянного тока (ГПТ)) на реостат. Полезная мощность на валу двигателя М1 рассчитывалась с помощью значений напряжения и тока, генерируемого двигателем посто-

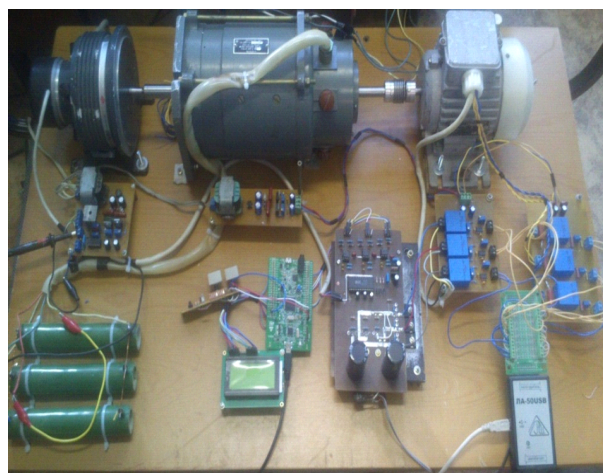


Рис. 4. Установка для исследования влияния хаотической частоты ШИМ на работу электродвигателя

янного тока, независимого возбуждения по выражению

$$P = U \cdot I + I^2 R_{\text{яц}} + \Delta P, \quad (3)$$

где $I^2 R_{\text{яц}}$ — мощность, идущая на потери в обмотках якорной цепи нагрузочной машины ($R_{\text{яц}} = 9,8 \text{ Ом}$); ΔP — механические потери агрегата М1-М2; U , I — напряжение и ток на нагрузке R_n . Так как скорость вращения ротора в ходе экспериментов одинакова, то механическими потерями ΔP пренебрегаем.

Измерения фазных токов и напряжений осуществлялись с помощью датчиков напряжения (ДН) и тока (ДТ), основанных на эффекте Холла. Датчики

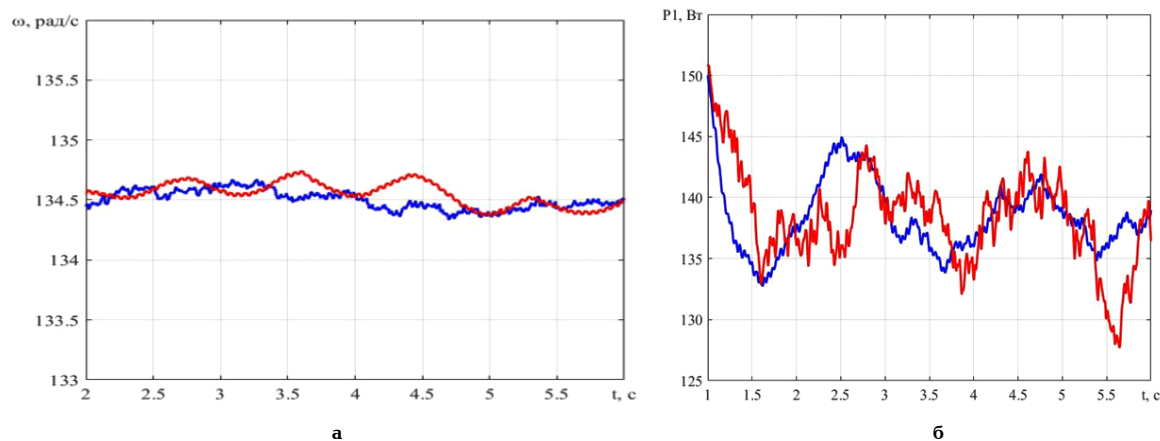


Рис. 5. Скорость ротора (а) и потребляемая мощность (б) при хаотической и периодической частоте ШИМ

Таблица 1

Технические данные АД

Тип двигателя	Мощность, кВт	При номинальной нагрузке			m_n	m_M	m_K	i_n
		Скольжение, %	КПД, %	Cos φ				
4AA50B4Y3	0,09	8,6	55	0,60	2,0	1,7	2,2	2,5

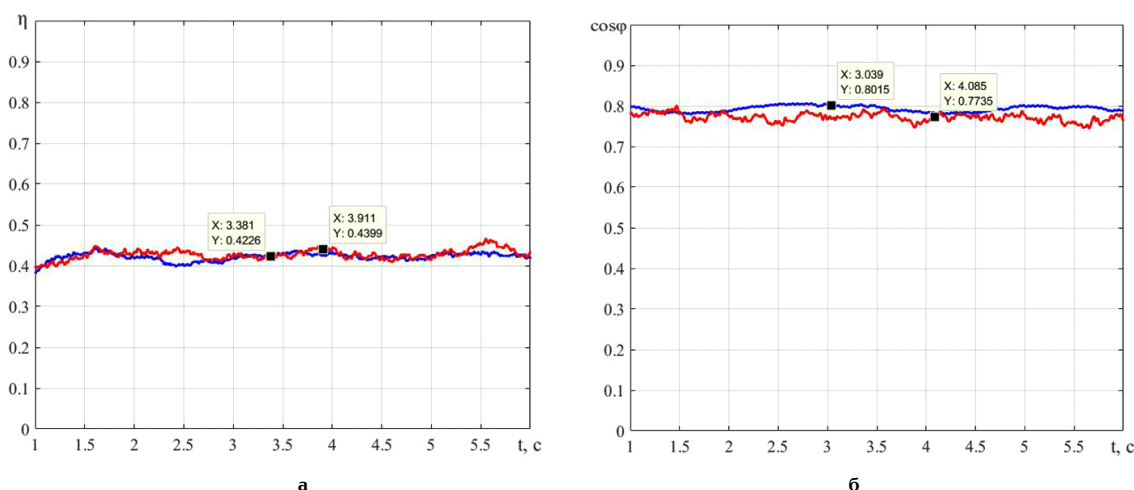


Рис. 6. Сравнение КПД (а) и $\cos\phi$ (б) при хаотической и периодической частоте ШИМ

обеспечивают гальваническую развязку между выходными и входными цепями. С выхода датчиков ДН1-ДН3 снимались сигналы трех фаз мгновенных фазных значений напряжения, с выхода датчиков ДТ1-ДТ3 — мгновенные значения тока. Частота вращения двигателя (рис. 5а) измерялась датчиком частоты вращения (ДЧ), в качестве которого используется энкодер с усилителем-преобразователем. Для проведения эксперимента выбран АД с короткозамкнутым ротором марки 4AA50B4Y3, параметры которого приведены в табл. 1.

В лабораторной установке преобразователь частоты имеет функцию задания величины несущей частоты ШИМ. Таким образом, программный код, написанный для микроконтроллера STM32F407, позволяет формировать как классическую ШИМ, так и ШИМ с хаотическим изменением несущей частоты. Такой подход позволил значительно упростить исследование и сравнить энергетические пока-

затели асинхронного двигателя. Схема управления IGBT транзисторами ПЧ имеет гальваническую развязку, которая реализована на микросхемах HCPL2631. Управление стойками полумоста осуществляется высокоскоростной микросхемой IR2130. Микросхема содержит три драйвера нижнего уровня и три драйвера верхнего уровня. Входные логические сигналы совместимы с логикой CMOS от 2,5В.

Результаты эксперимента. По результатам эксперимента построены энергетические показатели асинхронного электродвигателя, спектры выходного напряжения. Методика определения энергетических показателей рассмотрена в работах [7, 8]. Частотно-регулируемый асинхронный двигатель кинематически подключен к управляемому нагрузочному устройству, которое создает на валу двигателя нагрузочный момент. На первом этапе проведения работ АД подключался к ПЧ с периодической частотой ШИМ, испытания проводились при частоте 50 Гц,

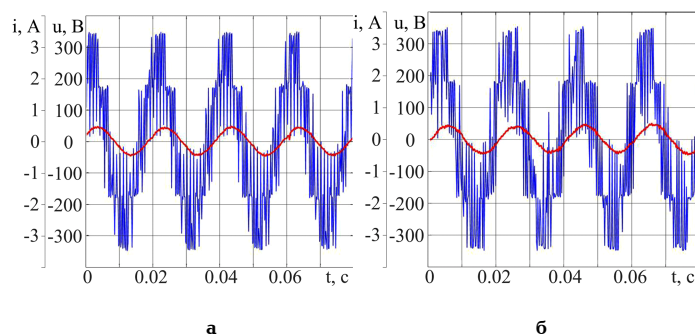


Рис. 7. Фазное напряжение и ток при периодической (а) и при хаотической (б) несущей ШИМ

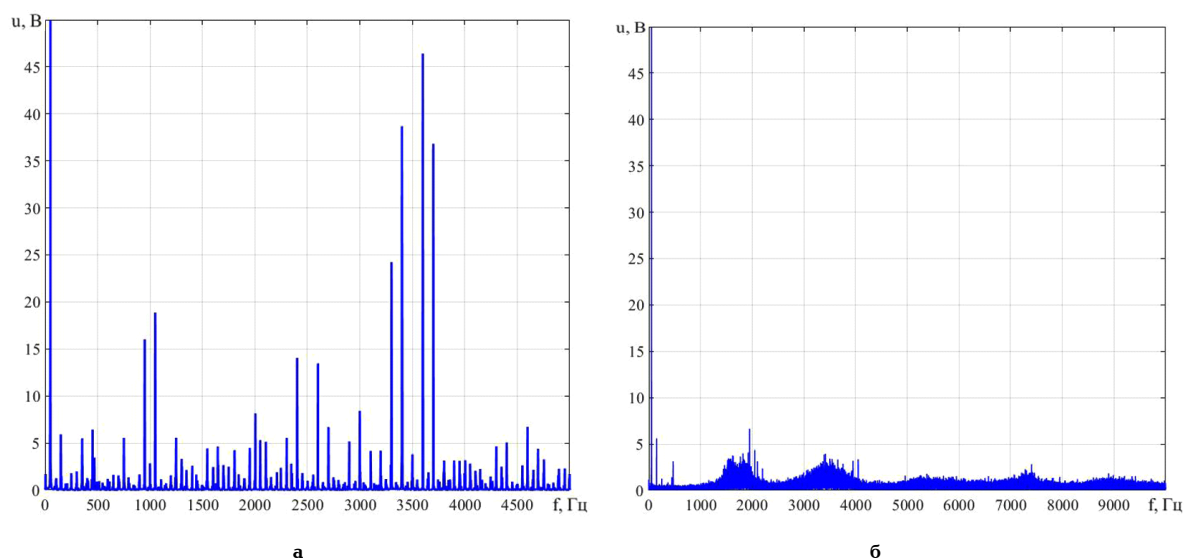


Рис. 8. Спектры выходного напряжения при периодической (а) и хаотической (б) частоте ШИМ

среднеквадратичное фазное напряжение составило 191,2 В. На втором этапе проведения работ несущая частота ШИМ ПЧ изменялась хаотически, при этом среднеквадратичное фазное напряжение составило 192,5 В с частотой 50 Гц.

На рис. 6а, б представлено сравнение КПД и $\cos\phi$ при периодической и хаотической частоте ШИМ. Из рис. 6а видно, что эффективность электродвигателя при периодической несущей ШИМ является практически постоянной, максимальное значение находится на уровне $\eta \approx 42\%$. Максимальное значение эффективности электродвигателя при хаотической частоте несущей ШИМ составляет $\eta \approx 44\%$. При этом полезная мощность в обоих случаях одинакова. На рис. 7а, б представлены мгновенные значения фазного тока и напряжения при периодической и хаотической частоте ШИМ. На рис. 8а, б приведены спектры выходного напряжения. Следует обратить внимание на резкое уменьшение величины отдельных гармоник вблизи частоты переключения при использовании хаотической частоты ШИМ. Отметим, что для асинхронного двигателя, используемого в экспериментальной части работы, общая (среднеквадратичная) полезная мощность, генерируемая машиной, не уменьшилась. Тем не менее энергетический спектр выходного напряжения (рис. 8б) стал широкополосным и непрерывным.

Вывод. В ходе исследования было установлено, что акустические шумы, испускаемые электродвигателями переменного тока и другими магнитными

компонентами в системах на основе преобразователей, работающих с несущей частотой в звуковом диапазоне, могут быть существенно уменьшены с использованием хаотической частоты ШИМ. Анализ спектров выходного напряжения показал, что ШИМ с хаотическим изменением частоты может также использоваться для получения соответствия стандартам электромагнитной совместимости с меньшими затратами на фильтрацию и экранирование, поскольку спектральные пики уменьшаются по сравнению с классической ШИМ.

Библиографический список

1. Мелешин В. Транзисторная преобразовательная техника: моногр. Смоленск: Техносфера, 2005. 632 с. ISBN 9785457737389.
2. Holtz J. Pulsewidth modulation for electronic power conversion // Proceedings of the IEEE. 1994. Vol. 82, no 8. P. 1194 – 1214.
3. Браславский И. Я., Ишматов З. Ш., Поляков В. Н. Энергосберегающий асинхронный электропривод. М.: Академия, 2004. 256 с.
4. Хабибуллин А. Т., Хасанов Д. О., Мухутдинов Р. М. Проявление высших гармоник при работе преобразователей частоты // Вестник магистратуры. 2016. №. 1 – 1. С. 65.
5. Cameron D. E., Lang J. H., Umans S. D. The origin and reduction of acoustic noise in doubly salient variable-reluctance motors // IEEE Transactions on Industry Applications. 1992. Vol. 28, no. 6. P. 1250 – 1255.

6. Федоров В. К., Федянин В. В., Федоров Д. В. Алгоритм формирования широтно-импульсной модуляции с несущей частотой в режиме детерминированного хаоса // Омский научный вестник. 2017. №. 2 (152). С. 45 – 49.

7. Федянин В. В. Влияние преобразователя частоты на коэффициент полезного действия асинхронного двигателя // Международный научно-исследовательский журнал. 2017. № 8 – 3 (62). С. 83 – 87. DOI: 10.23670/IRJ.2017.62.089.

8. Андриенко В. М. Определение энергетических показателей асинхронных двигателей при питании от статических преобразователей частоты // Электротехника и электромеханика. 2010. №. 3. С. 5 – 7.

ФЕДЯНИН Виктор Викторович, аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

ФЕДОРОВ Владимир Кузьмич, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

ФЕДОРОВ Дмитрий Владимирович, аспирант кафедры «Электрическая техника».

РУБАНОВ Николай Витальевич, студент гр. Э-144 энергетического института.

ПРОСКУРЯКОВ Семен Николаевич, студент гр. Э-142 энергетического института.

Адрес для переписки: k13201@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 27.09.2017 г.

© В. В. Федянин, В. К. Федоров, Д. В. Федоров, Н. В. Рубанов, С. Н. Проскуряков

УДК 621.3.011.7+621.3.049+621.3.06

В. З. КОВАЛЁВ
А. Г. ЩЕРБАКОВ
О. А. ПЕТУХОВА
А. А. ЗЯБКИН

Югорский государственный
университет,
г. Ханты-Мансийск

ВЛИЯНИЕ ОТКЛОНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ НА ЕЁ СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИ ВЕНТИЛЯТОРНОЙ НАГРУЗКЕ

В данной статье приводится описание актуальности проблемы энергоэффективности в электроприводах с асинхронными двигателями; приводится исследование влияния отклонения параметров математической модели асинхронной машины на её характеристики, отражающие энергоэффективность машины; приводится описание применяемой для исследования математической модели асинхронной машины и программного продукта, созданного на основе применяемой математической модели.

Ключевые слова: асинхронная машина, математическая модель в фазной системе координат, параметры математической модели, программный продукт, рабочие характеристики асинхронной машины.

Указ Президента РФ [1] № 899 от 7 июля 2011 года содержит перечень приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации. Среди данных направлений присутствует такое направление, как «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика». Направление «Энергоэффективность, энергосбережение» в значительной степени предполагает эффективное использование электрической энергии. Анализ систем производства, передачи и потребления электрической энергии показывает, что значительная часть потерь электрической энергии, до 90 % приходится на сферу её потребления [2]. Поэтому при решении задач энергосбережения и энергоэффективности именно на область потребления электрической энергии следует обращать особое внимание.

На сегодняшний день более 60 % вырабатываемой электрической энергии преобразуется в механиче-

скую энергию с помощью различных систем электрического привода. Таким образом, в большей степени на область применения электрического привода обращено внимание специалистов, занимающихся решением задач энергосбережения и повышения энергетической эффективности [2].

В последнее время в области электрического привода широкое распространение получают системы на базе асинхронных двигателей. Данное обстоятельство обусловлено рядом достоинств, которые характерны для асинхронных машин. На сегодняшний день асинхронными двигателями преобразуется в механическую работу от 47 до 53 % от всей вырабатываемой электрической энергии, количество выпускаемых асинхронных двигателей составляет около 80 % от общего числа выпускаемых электрических машин. Успехи в силовой электронике, наблюдающиеся в последнее время, позволяют осу-

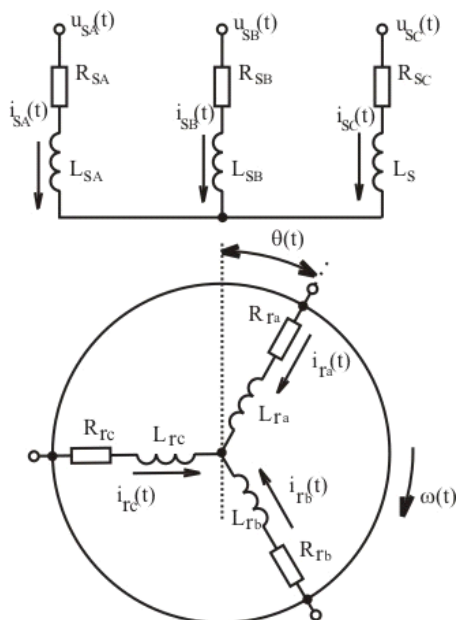


Рис. 1. Математическая модель асинхронной машины в фазной (естественной) системе координат

ществлять выпуск относительно дешёвых преобразователей частоты, которые позволяют преодолевать главный недостаток асинхронных двигателей — сложность регулирования скорости их вращения. Применение преобразователей частоты расширяет область применения асинхронного электропривода.

Перечисленные выше обстоятельства требуют исследования процессов преобразования энергии именно в асинхронных машинах с целью выявления режимов их работы, направленных на решение задач энергосбережения и повышения энергетической эффективности.

В последнее время также имеет место направление использование асинхронных машин в качестве генераторов электрической энергии и применение режима рекуперации, реализуемого в них [3, 4], что также требует более глубокого анализа процессов преобразования энергии в асинхронных машинах.

Для исследования процессов преобразования энергии в электрических машинах предполагается применение их математических моделей, которые были бы адекватны поставленным задачам, извлечение информации из которых давала бы удовлетворительную точность. Данному вопросу посвящён ряд работ [5, 6], согласно которым одной из наиболее полных математических моделей асинхронной машины является её математическая модель в фазных (естественных) системах координат. Данная математическая модель имеет ряд преимуществ, среди которых можно выделить следующее:

1. Все величины в применяемой системе уравнений имеют свой физический смысл и реальные значения. В первую очередь это относится к переменным обмоткам статора. Требуется дополнительная система приведения в том случае, если модель в фазной системе координат применяется к двигателю с короткозамкнутым ротором, обмотка которого рассматривается как многофазная.

2. Применение математической модели в фазной системе координат позволяет учесть все виды несимметрии параметров обмоток и питающих напряжений.

3. Применение математической модели в фазной системе координат позволяет выполнять расчеты электромагнитных и электромеханических процессов в статических и динамических режимах работы при питании от сети и источников с несинусоидальной формой выходного напряжения.

Согласно рассматриваемой математической модели асинхронная машина может быть представлена следующей схемой замещения (рис. 1), состоящей из двух систем взаимно перемещающихся трёхфазных обмоток. Вследствие вращения ротора соответствующие оси фаз этих обмоток сдвигаются друг относительно друга на угол Θ , величина которого непрерывно изменяется во времени. Согласно второму закону Кирхгофа, для данной схемы (рис. 1) справедливо следующее матричное уравнение:

$$U = RI + \frac{d\Psi}{dt}, \quad (1)$$

где

$$U^T = [u_A \ u_B \ u_C \ u_a \ u_b \ u_c]^T \quad (2)$$

— транспонированный вектор фазных напряжений, приложенных к обмоткам статора и к обмоткам ротора;

$$R = \begin{bmatrix} R_A & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_B & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_C & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_a & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

— диагональная матрица активных сопротивлений фаз статора (R_A, R_B, R_C) и ротора (R_a, R_b, R_c);

$$I^T = [i_A \ i_B \ i_C \ i_a \ i_b \ i_c]^T \quad (4)$$

— транспонированный вектор мгновенных значений токов, протекающих по обмоткам статора (i_A, i_B, i_C) и по обмоткам ротора (i_a, i_b, i_c);

$$\left[\frac{d\Psi}{dt} \right]^T = \left[\frac{d\Psi_A}{dt} \ \frac{d\Psi_B}{dt} \ \frac{d\Psi_C}{dt} \ \frac{d\Psi_a}{dt} \ \frac{d\Psi_b}{dt} \ \frac{d\Psi_c}{dt} \right]^T \quad (5)$$

— транспонированный вектор производных по времени от полных потокосцеплений фаз статора

$$\left(\frac{d\Psi_A}{dt}, \frac{d\Psi_B}{dt}, \frac{d\Psi_C}{dt} \right) \text{ и ротора } \left(\frac{d\Psi_a}{dt}, \frac{d\Psi_b}{dt}, \frac{d\Psi_c}{dt} \right).$$

Величины потокосцеплений находятся из следующего матричного уравнения:

$$\Psi = MI. \quad (6)$$

Здесь Ψ — матрица полных потокосцеплений всех фаз статора и ротора:

$$\Psi^T = [\Psi_A \ \Psi_B \ \Psi_C \ \Psi_a \ \Psi_b \ \Psi_c]^T, \quad (7)$$

I — матрица токов (4), M — матрица собственных и взаимных индуктивностей:

$$(\text{матрица } 1). \quad (8)$$

В данной матрице p — число пар полюсов машины; L_A, L_B, L_C — собственные индуктивности фаз статора; L_a, L_b, L_c — собственные индуктивности фаз ротора; $M_{AB}, M_{BA}, M_{AC}, M_{CA}, M_{BC}, M_{CB}$ — взаимные индуктивности между обмотками фаз статора; $M_{ab},$

L_A	M_{AB}	M_{AC}	$M_{Aa} \cos(\Theta)$	$M_{Ab} \cos(p\Theta + \frac{2}{3}\pi)$	$M_{Ac} \cos(p\Theta - \frac{2}{3}\pi)$
M_{BA}	L_B	M_{BC}	$M_{Ba} \cos(p\Theta - \frac{2}{3}\pi)$	$M_{Bb} \cos(p\Theta)$	$M_{Bc} \cos(p\Theta + \frac{2}{3}\pi)$
M_{CA}	M_{CB}	L_C	$M_{Ca} \cos(p\Theta + \frac{2}{3}\pi)$	$M_{Cb} \cos(p\Theta - \frac{2}{3}\pi)$	$M_{Cc} \cos(p\Theta)$
$M_{aA} \cos(p\Theta)$	$M_{aB} \cos(p\Theta - \frac{2}{3}\pi)$	$M_{aC} \cos(p\Theta + \frac{2}{3}\pi)$	L_a	M_{ab}	M_{ac}
$M_{bA} \cos(p\Theta + \frac{2}{3}\pi)$	$M_{bB} \cos(p\Theta)$	$M_{bC} \cos(p\Theta - \frac{2}{3}\pi)$	M_{ba}	L_b	M_{bc}
$M_{cA} \cos(p\Theta - \frac{2}{3}\pi)$	$M_{cB} \cos(p\Theta + \frac{2}{3}\pi)$	$M_{cC} \cos(p\Theta)$	M_{ca}	M_{cb}	L_c

Матрица 1

$M_{ba}, M_{ac}, M_{ca}, M_{bc}, M_{cb}$ — взаимные индуктивности между обмотками фаз ротора; $M_{Aa}, M_{aA}, M_{Ab}, M_{bA}, M_{Ac}, M_{cA}, M_{Ba}, M_{aB}, M_{Bb}, M_{bB}, M_{Bc}, M_{cB}, M_{Ca}, M_{aC}, M_{Cb}, M_{bC}, M_{Cc}$ — максимальные взаимные индуктивности между соответствующими обмотками фаз статора и ротора. Примем следующие допущения: 1) отсутствие насыщения в магнитной цепи; 2) отсутствие вытеснения токов в роторе; 3) воздушный зазор между статором и ротором гладкий; 4) параметры машины в течение переходного процесса остаются постоянными; 5) результирующее магнитное поле вдоль воздушного зазора изменяется синусоидально. Тогда для собственных и взаимных индуктивностей двигателя справедливы следующие соотношения:

$$\begin{aligned}
 1) \quad & M_{AB} = M_{BA} = M_{AC} = M_{CA} = M_{BC} = M_{CB} = \\
 & = M_{CB} = M \cos\left(\frac{2}{3}\pi\right) = -0,5M, \\
 2) \quad & M_{ab} = M_{ba} = M_{ac} = M_{ca} = M_{bc} = M_{cb} = \\
 & = M \cos\left(\frac{2}{3}\pi\right) = -0,5M, \\
 3) \quad & M_{Aa} = M_{aA} = M_{Ab} = M_{bA} = M_{Ac} = M_{cA} = M_{Ba} = \\
 & = M_{aB} = M_{Bb} = M_{bB} = M_{Bc} = M_{cB} = M_{Ca} = M_{aC} = \\
 & = M_{Cb} = M_{bC} = M_{Cc} = M_{cC} = M, \\
 4) \quad & L_A = L_B = L_C = L_s + M, \\
 5) \quad & L_a = L_b = L_c = L_r + M.
 \end{aligned}$$

Соответственно, матрица (8) примет следующий вид:

$$(матрица 2). \quad (9)$$

В матрицах (8)–(9) Θ — геометрический угол поворота ротора, связанный с угловой скоростью ротора ω соотношением:

$$\frac{d\Theta}{dt} = \omega. \quad (10)$$

В свою очередь, угловая скорость ротора ω , согласно второму закону Ньютона, определяется из дифференциального уравнения:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J}(M_E - M_C). \quad (11)$$

Здесь J — приведённый момент инерции; M_C — механический момент сопротивления на валу; M_E — электромагнитный момент, создаваемый асинхрон-

ной машиной и определяющийся как частная производная от общего запаса электромагнитной энергии машины по геометрическому углу поворота ротора:

$$M_E = \frac{dW_E}{d\Theta}. \quad (12)$$

В данной формуле W_E — электромагнитная энергия машины, определяемая как:

$$W_E = \frac{1}{2} [\Psi_A i_A + \Psi_B i_B + \Psi_C i_C + \Psi_a i_a + \Psi_b i_b + \Psi_c i_c], \quad (13)$$

где $\Psi_A, \Psi_B, \Psi_C, \Psi_a, \Psi_b, \Psi_c$ — полные потокосцепления фаз статора и ротора, определяемые из уравнения (6); $i_A, i_B, i_C, i_a, i_b, i_c$ — мгновенные значения токов в фазах статора и ротора.

Таким образом, математическая модель асинхронной машины в фазной (естественной) системе координат имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{d\Psi}{dt} = U - RI, \\ \Psi = MI, \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J}(M_E - M_C), \\ \frac{d\Theta}{dt} = \omega, \\ M_E = \frac{dW_E}{d\Theta}, \\ W_E = \frac{1}{2} [\Psi_A i_A + \Psi_B i_B + \Psi_C i_C + \Psi_a i_a + \Psi_b i_b + \Psi_c i_c] \end{cases} \quad (14)$$

Данная модель асинхронной машины состоит из девяти дифференциальных и семи алгебраических уравнений.

Аналитического решения система уравнений (14) не имеет, поэтому для её решения необходимо применять численные методы. Существует несколько способов решения системы уравнений (14) с помощью численных методов. Один из них — приведение исходной системы уравнений (14) к нормальной форме Коши и последующее применение стандартных процедур численного расчёта, базирующихся на методах типа Рунге — Кутты, Адамса, Гира, Розенброка [7]. Другой подход — построение численных методов, применяемых непосредственно к модели вида (14), называемой моделью в канонической форме [8]. В данной работе рассматривается первый

$$M = \begin{bmatrix} L_S & -0,5M & -0,5M & M \cos(p\Theta) & M \cos(p\Theta + \frac{2}{3}\pi) & M \cos(p\Theta - \frac{2}{3}\pi) \\ -0,5M & L_S & -0,5M & M \cos(p\Theta - \frac{2}{3}\pi) & M \cos(p\Theta) & M \cos(p\Theta + \frac{2}{3}\pi) \\ -0,5M & -0,5M & L_S & M \cos(p\Theta + \frac{2}{3}\pi) & M \cos(p\Theta - \frac{2}{3}\pi) & M \cos(p\Theta) \\ M \cos(p\Theta) & M \cos(p\Theta - \frac{2}{3}\pi) & M \cos(p\Theta + \frac{2}{3}\pi) & L_r & -0,5M & -0,5M \\ M \cos(p\Theta + \frac{2}{3}\pi) & M \cos(p\Theta) & M \cos(p\Theta - \frac{2}{3}\pi) & -0,5M & L_r & -0,5M \\ M \cos(p\Theta - \frac{2}{3}\pi) & M \cos(p\Theta + \frac{2}{3}\pi) & M \cos(p\Theta) & -0,5M & -0,5M & L_r \end{bmatrix}$$

Матрица 2

$$\frac{dM}{dt} = -\omega \cdot \omega_1 \cdot p \cdot M = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \sin(p\Theta) & \sin(p\Theta + \frac{2}{3}\pi) & \sin(p\Theta - \frac{2}{3}\pi) \\ 0 & 0 & 0 & \sin(p\Theta - \frac{2}{3}\pi) & \sin(p\Theta) & \sin(p\Theta + \frac{2}{3}\pi) \\ 0 & 0 & 0 & \sin(p\Theta + \frac{2}{3}\pi) & \sin(p\Theta - \frac{2}{3}\pi) & \sin(p\Theta) \\ \sin(p\Theta) & \sin(p\Theta - \frac{2}{3}\pi) & \sin(p\Theta + \frac{2}{3}\pi) & 0 & 0 & 0 \\ \sin(p\Theta + \frac{2}{3}\pi) & \sin(p\Theta) & \sin(p\Theta - \frac{2}{3}\pi) & 0 & 0 & 0 \\ \sin(p\Theta - \frac{2}{3}\pi) & \sin(p\Theta + \frac{2}{3}\pi) & \sin(p\Theta) & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Матрица 3

подход, требующий приведения исходной системы уравнения к нормальной форме Коши.

В итоге, опуская промежуточные математические преобразования, получаем:

$$\begin{cases} \frac{dI}{dt} = M^{-1} \left(U - \left(R + \frac{dM}{dt} \right) I \right) \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J\omega_1} (M_E - M_C) \\ \frac{d\Theta}{dt} = \omega \cdot \omega_1, \\ M_E = -M \cdot p \cdot \begin{pmatrix} \sin(p\Theta) \cdot (i_a i_A + i_b i_B + i_c i_C) + \\ + \sin\left(p\Theta + \frac{2}{3}\pi\right) \cdot (i_b i_A + i_c i_B + i_a i_C) + \\ + \sin\left(p\Theta - \frac{2}{3}\pi\right) \cdot (i_c i_A + i_a i_B + i_b i_C) \end{pmatrix} \end{cases}, (15)$$

где

$$\omega = \frac{\omega}{\omega_1};$$

ω_1 — синхронная скорость двигателя, рад/с,

$$\frac{dI^T}{dt} = \left[\frac{di_A}{dt} \quad \frac{di_B}{dt} \quad \frac{di_C}{dt} \quad \frac{di_a}{dt} \quad \frac{di_b}{dt} \quad \frac{di_c}{dt} \right]^T, (16)$$

(матрица 3).

(17)

В дальнейшем $\frac{dM}{dt}$ будем называть матрицей динамических индуктивностей.

Используя систему уравнений (15), был разработан программный продукт [9] и реализован на языке Object Pascal в среде Delphi, который в дальнейшем был усовершенствован и предлагается в данной работе. Основное окно предлагаемого программного продукта ADfаз1 представлено на рис. 2. Как видно из рис. 2, окно содержит группу кнопок «Исходные данные»: «Напряжение», «Двигатель», «Метод расчёта». При выполнении нажатия с помощью мыши на кнопку «Напряжение» на экране появляется диалоговое окно «Параметры напряжения питания» (рис. 3). С помощью данного диалогового окна производится формирование закона изменения фазного напряжения каждой фазы питающего двигателя напряжения, подаваемого на обмотки фаз статора моделируемого асинхронного двигателя. Фазное напряжение питания каждой фазы предполагается состоящим из 40 гармоник, при этом с помощью диалогового окна (рис. 3) существует возможность задания амплитудного значения и начальной фазы для каждой из 40 гармоник фазных напряжений питания. Также с помощью диалогового окна (рис. 3) существует возможность задания частоты основной гармоники фазного напряжения питания асинхронного двигателя. Нажатие с помощью мыши на кнопку

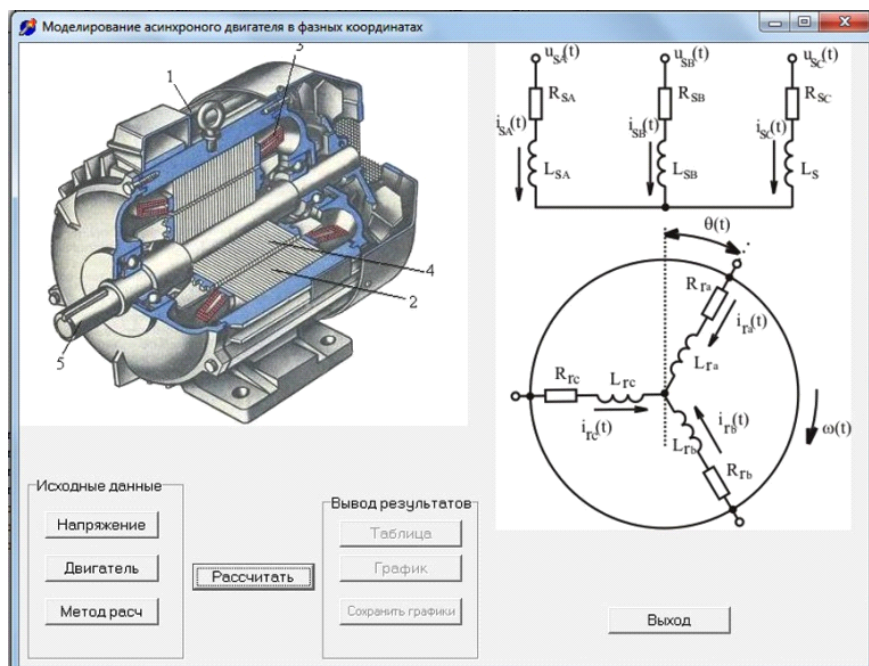


Рис. 2. Основное окно программы ADFaz1

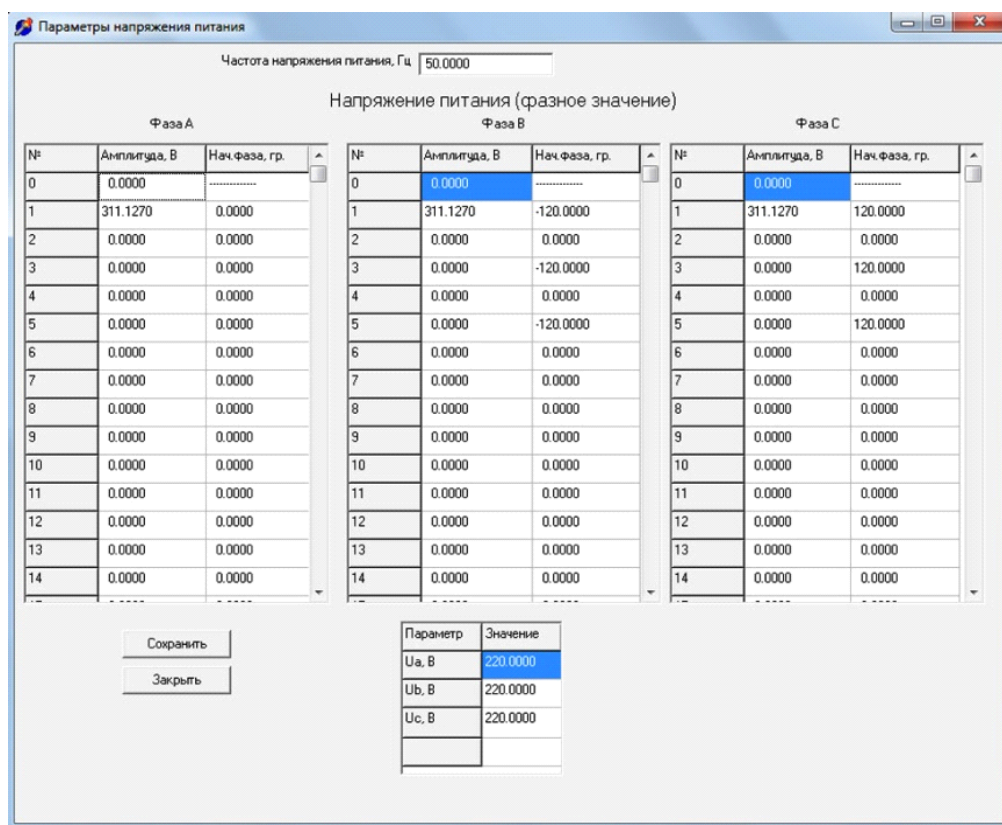


Рис. 3. Окно для ввода параметров напряжения питания двигателя

«Сохранить» производит сохранение всех данных, вводимых с помощью рассматриваемого диалогового окна на жесткий диск компьютера. Нажатие с помощью мыши на кнопку «Закрыть» приводит к закрытию диалогового окна «Параметры напряжения питания» с автоматическим сохранением вводимых данных на жестком диске компьютера.

Применение кнопки «Двигатель» основного окна предлагаемого программного продукта ADFaz1 (рис. 2) приводит к появлению на экране диалогового окна «Параметры математической модели асинхрон-

ной машины в фазной системе координат» (рис. 4). С помощью данного диалогового окна существует возможность введения в программу следующих исходных данных, необходимых для расчёта:

1) паспортных данных асинхронной машины — марки асинхронной машины; номинальной мощности, кВт; номинальной скорости вращения, об./мин; числа пар полюсов; момента инерции ротора, кг·м²;

2) параметров математической модели асинхронной машины в фазной системе координат — актив-

Паспортные данные асинхронной машины

Параметр	Значение
Марка	AIР132М4
Номинальная мощность $P_{ном}$, кВт	11.0
Номинальная скорость вращения $n_{ном}$, об/мин	1450
Число пар полюсов	2
Момент инерции ротора J , кг·м ²	0.0400

Параметры механической нагрузки

Крановая

$M_c(t) = 25$ % $M_{ном}$

Параметры математической модели асинхронной машины

Параметр	Фаза А	Фаза В	Фаза С
Активное сопротивление обмотки статора R_s , Ом	0.5230	0.5230	0.5230
Индуктивность рассеивания обмотки статора L_s , Гн	0.0885	0.0885	0.0885
Активное сопротивление обмотки ротора R_r , Ом	0.3940	0.3940	0.3940
Индуктивность рассеивания обмотки ротора L_r , Гн	0.0885	0.0885	0.1020
Взаимная индуктивность между обмотками L_m , Гн	0.0857	0.0857	0.0857

Сохранить Закрыть

Рис. 4. Окно для ввода параметров асинхронной машины

ного сопротивления обмотки статора, Ом; индуктивности рассеивания обмотки статора, Гн; активного сопротивления обмотки ротора, Ом; индуктивности рассеивания обмотки ротора, Гн; взаимной индуктивности между обмотками, Гн.

Кроме вышеперечисленного, также с помощью рассматриваемого диалогового окна (рис. 4) существует возможность выбора характера механической нагрузки асинхронной машины и определения её параметров.

Применение кнопки «Метод расч» основного окна предлагаемого программного продукта AD-Faz1 (рис. 2) приводит к появлению на экране диалогового окна «Параметры метода расчёта» (рис. 5). С помощью данного диалогового окна существует возможность введения исходных данных, необходимых для применения используемого численного метода решения системы дифференциальных уравнений (15). Среди вводимых параметров применяемого численного метода присутствуют следующие: время начала расчёта, с; время окончания расчёта, с; начальный шаг интегрирования, с; допустимая погрешность расчёта. Кроме этого, с помощью диалогового окна (рис. 5) существует возможность определения начальных значений каждой из переменных, входящих в систему дифференциальных уравнений (15), в числе которых присутствуют: начальные значения токов фаз статора, А; начальные значения токов фаз ротора, А; начальная скорость вращения ротора, отн. ед.; начальный угол поворота ротора, рад.

После определения всех необходимых исходных данных для выполнения расчёта и введения их в программу с помощью соответствующих диалоговых окон (рис. 3–5) на основном окне программы AD-Faz1 (рис. 2) следует с помощью мыши нажать кнопку «Рассчитать». Процесс выполнения расчёта может занять некоторое время, при этом ход выполнения процесса расчёта будет отображаться на экране (рис. 6). При завершении расчёта на основном окне программы AD-Faz1 (рис. 2) становятся доступными кнопки группы «Вывод результатов»: «Таблица», «График», «Сохранить графики». Кнопки «Таблица», «График» позволяют осуществить вывод результатов

расчётов на экран в виде таблицы, либо в виде графиков соответственно (рис. 7). Кнопка «Сохранить графики» позволяет сохранить результаты расчётов в виде графиков на жестком диске компьютера.

С помощью предлагаемого программного продукта существует возможность исследовать режимы работы асинхронных машин в статических и динамических режимах при наличии несимметрии в фазах статора и ротора, и при несинусоидальности питающего двигателя напряжения. В данной работе с помощью предлагаемого программного продукта AD-Faz1 проводилось исследование влияния несимметрии соседних фаз обмоток статора и ротора на статические характеристики асинхронного двигателя. Данная проблема обусловлена тем обстоятельством, что параметры математической модели асинхронной машины (15) в значительной степени определяются конструктивными особенностями машины [10], а также сильно зависят от применяемых материалов и качества сборки электрической машины. Как показывает практика [11], разброс параметров математической модели асинхронной машины (15) может достигать 20 %.

Значения параметров математической модели асинхронной машины (15) в процессе её эксплуатации под воздействием различных факторов могут также изменяться. Данные изменения могут иметь как обратимый, так и необратимый характер. Среди факторов, приводящих к изменению параметров математической модели асинхронной машины (15), могут выступать, например, перегрев машины, изменяющий значения величины активных сопротивлений обмоток статора и ротора; короткие замыкания и периодические перегрузки машины, приводящие к изменению индуктивностей рассеивания обмоток статора, ротора и взаимной индуктивности между обмотками; износ подшипниковых узлов, изменяющий значение взаимной индуктивности между обмотками статора и ротора и т.п. Вопросам определения значений параметров математических моделей электротехнических устройств, к которым могут быть отнесены и асинхронные машины посвящен ряд работ [8, 11–15].

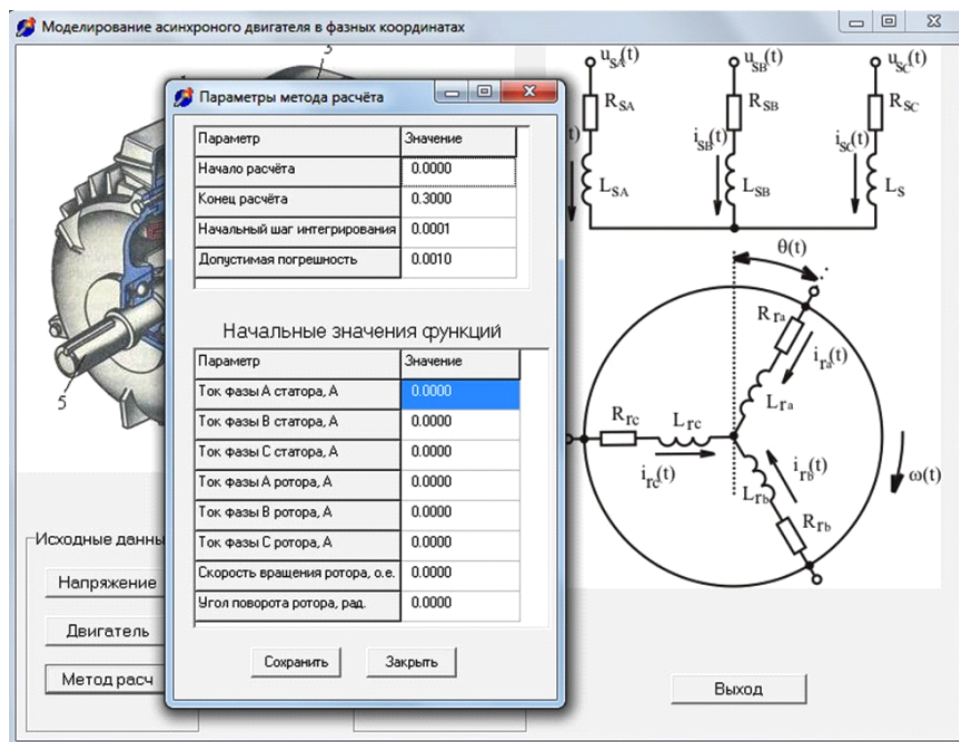


Рис. 5. Окно для ввода параметров численного метода расчёта

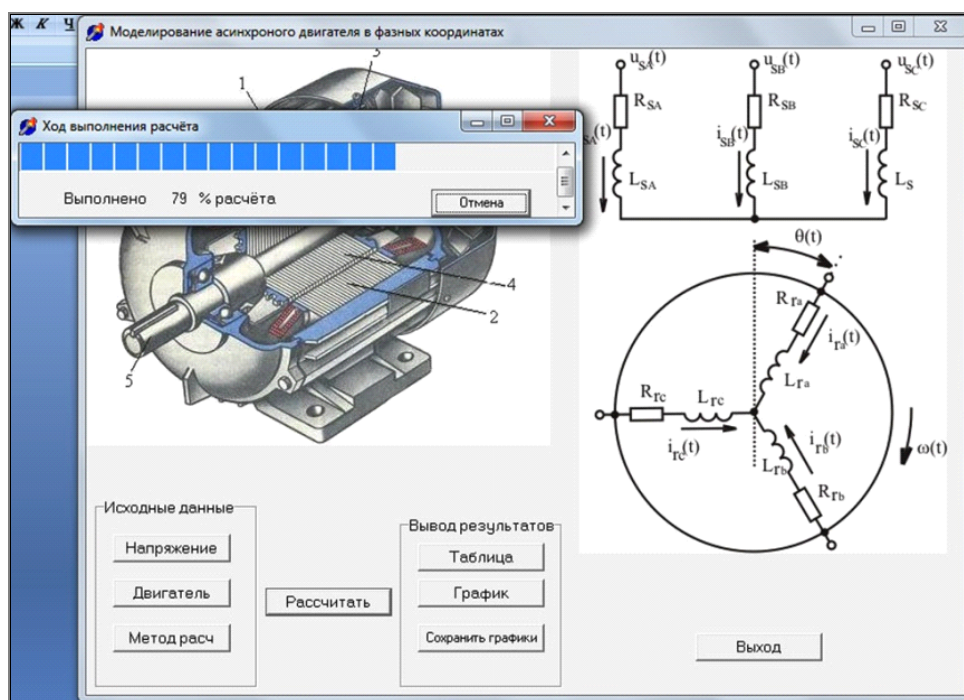


Рис. 6. Процесс вычисления программы ADFaz1

С помощью предлагаемого в работе программного продукта ADFaz1 проводилось исследование влияния отклонения параметров математической модели асинхронного двигателя на его рабочие характеристики в установившемся режиме. В качестве исследуемого двигателя был выбран двигатель марки АИР132М4, имеющий следующие паспортные данные:

номинальная мощность, кВт.....11;
 номинальная скорость вращения ротора, об./мин.....1450;
 число пар полюсов.....2;
 момент инерции ротора, кг·м².....0,04.

Параметры математической модели (15) рассматриваемого асинхронного двигателя имеют следующие значения:

активное сопротивление обмотки статора, Ом.....0,5230;
 индуктивность рассеивания обмотки статора, Гн.....0,0885;
 активное сопротивление обмотки ротора, Ом.....0,3940;
 индуктивность рассеивания обмотки ротора, Гн.....0,0885;
 взаимная индуктивность между обмотками статора и ротора, Гн.....0,0857.

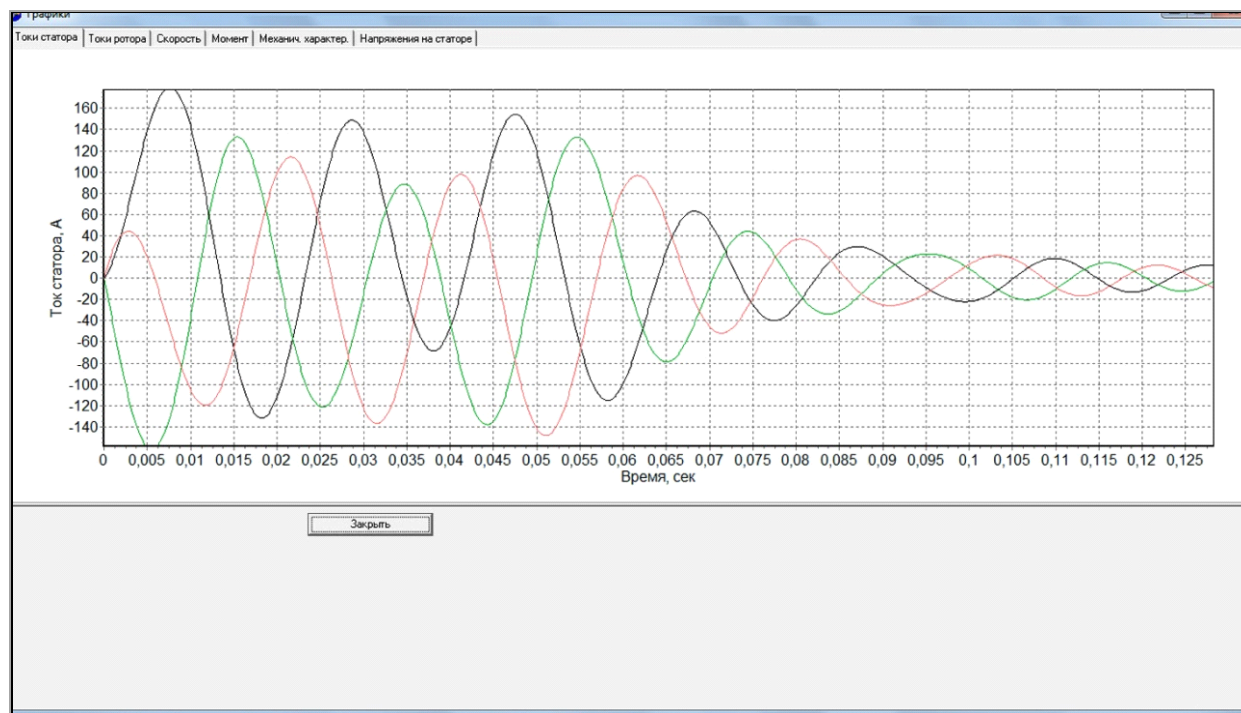


Рис. 7. Вывод информации расчётов в виде графиков

В качестве исследуемых рабочих характеристик рассматривались:

- 1) зависимость потребляемой двигателем мощности P_1 от мощности на валу двигателя P_2 ;
- 2) зависимость механического момента двигателя M от мощности на его валу P_2 ;
- 3) зависимость КПД двигателя от мощности на его валу P_2 ;
- 4) зависимость скорости вращения ротора двигателя n_2 от мощности на его валу P_2 .

В качестве изменяемых параметров математической модели (15) рассматривались:

- 1) изменение в одной из фаз активного сопротивления обмотки статора в диапазоне от 0 до 1,17 от первоначального значения;
- 2) изменение в одной из фаз индуктивности рассеивания обмотки статора в диапазоне от 0 до 1,05 от первоначального значения;
- 3) изменение в одной из фаз активного сопротивления обмотки ротора в диапазоне от 0 до 1,15 от первоначального значения;
- 4) изменение в одной из фаз индуктивности рассеивания обмотки ротора в диапазоне от 0 до 1,15 от первоначального значения.

В результате проведённых исследований было определено следующее:

- 1) изменение активного сопротивления обмотки статора (табл. 1) на 17 % приводит к увеличению потребляемой двигателем мощности на 2–4 % в режиме, близком к режиму холостого хода. Также в этом режиме наблюдается увеличение КПД асинхронной машины на 2,7 %, увеличение механического момента и механической мощности на валу машины на 6,4 %. В режиме работы двигателя, близком к номинальному, существенных изменений рабочих характеристик не наблюдается. Также следует отметить увеличение неравномерности потребляемой мощности машины по фазам: в режиме, близком к режиму холостого хода машины, на 4,8 %, в режиме, близком к номинальному, — на 2–2,3 %. Данное обстоятельство может привести к локальным

перегревам обмотки статора асинхронной машины и досрочному выходу части обмотки статора из строя;

- 2) изменение индуктивности рассеивания одной из фаз обмотки статора (табл. 2) на 5,1 % приводит к большему, чем в предыдущем случае, увеличению потребляемой двигателем мощности, и, в режиме близком к холостому ходу и в номинальном режиме: в режиме, близком к холостому ходу, потребляемая двигателем мощность увеличивается на 4,5 %, в номинальном режиме — на 1,74–2 %. Также происходит изменение КПД двигателя: в режиме, близком к режиму холостого хода, КПД увеличивается на 1,32 %, в режиме, близком к номинальному, — снижается на 1,2 %. Кроме этого, как следует из табл. 2, значительно увеличивается неравномерность потребляемой из сети мощности по фазам, что создаёт дополнительные условия для возникновения локальных перегревов обмотки статора. Отклонение значения индуктивности рассеивания обмотки статора также оказывает влияние и на вид динамических характеристик асинхронной машины, что требует дополнительного исследования;

- 3) изменение индуктивности рассеивания обмотки ротора (табл. 3) на 15 % приводит к изменениям исследуемых рабочих характеристик, аналогичным изменениям, характерным для изменения активного сопротивления обмотки статора, при этом наблюдается меньшая неравномерность потребляемой из сети мощности в соседних фазах обмотки статора;

- 4) изменение индуктивности рассеивания одной из фаз обмотки ротора (табл. 4) приводит к увеличению потребляемой двигателем мощности в режиме, близком к режиму холостого хода, на 4,24 %, в режиме, близком к номинальному, — на 2,03 %. В режиме, близком к холостому ходу, также наблюдается увеличение механического момента и КПД машины. В отличие от изменения индуктивности рассеивания обмотки статора, рассматриваемый параметр не приводит к значительной неравномерности потре-

Таблица 1

**Изменение рабочих характеристик асинхронного двигателя АИР132М4
при изменении активного сопротивления фазы С обмотки статора на 17 %**

	0,25·М _{ном}	0,50·М _{ном}	0,75·М _{ном}	1,00·М _{ном}	1,25·М _{ном}
Изменение активной мощности, потребляемой фазой А, %	2,52	0,04	– 0,30	– 0,11	0,30
Изменение активной мощности, потребляемой фазой В, %	4,88	2,36	1,37	2,05	2,29
Изменение активной мощности, потребляемой фазой С, %	3,60	– 0,02	– 0,97	– 0,88	– 0,55
Изменение активной мощности, потребляемой двигателем, %	3,57	0,54	0,30	0,46	0,72
Изменение механического момента на валу двигателя, %	6,43	– 2,51	1,62	0,34	0,22
Изменение скорости вращения ротора, %	– 0,03	– 0,05	0,08	0,00	– 0,04
Изменение КПД двигателя, %	2,73	– 0,39	– 0,11	– 0,12	– 0,54
Изменение механической мощности на валу двигателя, %	6,40	– 2,56	1,70	0,34	0,18

Таблица 2

**Изменение рабочих характеристик асинхронного двигателя АИР132М4
при изменении индуктивности рассеивания фазы С обмотки статора на 5,1 %**

	0,25·М _{ном}	0,50·М _{ном}	0,75·М _{ном}
Изменение активной мощности, потребляемой фазой А, %	28,80	25,02	26,58
Изменение активной мощности, потребляемой фазой В, %	29,42	22,52	22,21
Изменение активной мощности, потребляемой фазой С, %	– 44,61	– 45,08	– 43,57
Изменение активной мощности, потребляемой двигателем, %	4,54	0,82	1,74
Изменение механического момента на валу двигателя, %	5,78	– 3,27	1,88
Изменение скорости вращения ротора, %	0,00	– 0,03	– 0,01
Изменение КПД двигателя, %	1,32	– 1,35	– 1,15
Изменение механической мощности на валу двигателя, %	5,78	– 3,30	1,87

Таблица 3

**Изменение рабочих характеристик асинхронного двигателя АИР132М4
при изменении активного сопротивления фазы С обмотки ротора на 15 %**

	0,25·М _{ном}	0,50·М _{ном}	0,75·М _{ном}	1,00·М _{ном}	1,25·М _{ном}
Изменение активной мощности, потребляемой фазой А, %	3,59	– 1,42	– 0,10	0,81	0,22
Изменение активной мощности, потребляемой фазой В, %	3,58	– 1,45	– 0,46	0,39	– 0,17
Изменение активной мощности, потребляемой фазой С, %	3,64	– 0,50	0,27	0,53	0,00
Изменение активной мощности, потребляемой двигателем, %	3,60	– 1,12	– 0,10	0,58	0,02
Изменение механического момента на валу двигателя, %	6,47	– 3,41	1,75	0,19	0,05
Изменение скорости вращения ротора, %	– 0,07	– 0,21	0,03	– 0,05	0,03
Изменение КПД двигателя, %	1,77	– 1,07	0,12	0,60	0,06
Изменение механической мощности на валу двигателя, %	6,39	– 3,61	1,78	0,14	0,08

ляемой из сети мощности в соседних фазах обмотки статора.

Для изучения более детального влияния отклонения параметров математической модели асинхронной машины (15) на качество его рабочих характеристик с помощью предлагаемого в данной работе программного продукта предполагается выполнить следующее:

1) провести исследование влияния изменения параметров математической модели (15) на динамические характеристики машины;

2) провести более детальное исследование влияния одновременного изменения нескольких параметров математической модели асинхронного двигателя (15) на его статические и динамические характеристики;

3) провести исследование влияния одновременного изменения нескольких параметров математической модели асинхронного двигателя (15) на его динамические характеристики при вентиляторной нагрузке;

4) разработать для более эффективного извлечения информации из математической модели (15) специализированный численный метод, адаптированный для решения поставленных выше задач по критерию «время – точность».

Библиографический список

1. Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологии и техники в РФ и перечня критических

**Изменение рабочих характеристик асинхронного двигателя АИР132М4
при изменении индуктивности рассеивания фазы С обмотки ротора на 15,3 %**

	$0,25 \cdot M_{ном}$	$0,50 \cdot M_{ном}$	$0,75 \cdot M_{ном}$	$1,00 \cdot M_{ном}$
Изменение активной мощности, потребляемой фазой А, %	4,21	1,65	0,69	1,88
Изменение активной мощности, потребляемой фазой В, %	4,36	1,59	0,78	2,09
Изменение активной мощности, потребляемой фазой С, %	4,15	1,61	0,65	2,12
Изменение активной мощности, потребляемой двигателем, %	4,24	1,62	0,71	2,03
Изменение механического момента на валу двигателя, %	5,42	– 3,06	2,20	1,42
Изменение скорости вращения ротора, %	– 0,02	– 0,05	0,09	– 0,33
Изменение КПД двигателя, %	1,11	– 2,00	0,06	– 0,92
Изменение механической мощности на валу двигателя, %	5,40	– 3,11	2,28	1,09

технологий: указ Президента РФ № 899 от 7 июля 2011 г. Доступ из справ.-правовой системы «Консультант Плюс».

2. Ильинский Н. Ф., Москаленко В. В. Электропривод: энерго- и ресурсосбережение. М.: Издательский центр «Академия», 2008. 208 с. ISBN 978-5-7695-2849-1.

3. Щербаков А. Г., Архипова О. В. Проблемы использования автономных электрических станций на базе асинхронных машин с короткозамкнутым ротором // Вестник Югорского государственного университета. 2016. № 3 (42). С. 97 – 103.

4. Падалко Д. А. Электромагнитные процессы генерирования электроэнергии в мехатронной системе с асинхронной машиной: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Томск, 2016. 181 с.

5. Копылов И. П. Электромеханические преобразователи энергии. М.: Энергия, 1973. 400 с.

6. Иванов-Смоленский А. В. Электрические машины. М.: Энергия, 1980. 928 с.

7. Вержбицкий В. М. Основы численных методов. М.: Высшая школа, 2002. 840 с. ISBN 5-06-004020-8.

8. Ковалёв В. З., Щербаков А. Г., Ковалёв А. Ю. Идентификация параметров и характеристик математических моделей электротехнических устройств: моногр. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2005. 108 с.

9. Щербаков А. Г., Мальгин Г. В. Математическая модель асинхронной машины в фазной системе координат. М.: ВНИИЦ, 2001. Инв. № 50200100256.

10. Проектирование электрических машин / Под ред. И. П. Копылова. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Юрайт, 2011. 767 с. ISBN 978-5-9916-0904-3.

11. Ковалёв В. З., Щербаков А. Г., Архипов А. В., Ковалёв А. Ю., Аникин В. В. Идентификация параметров схемы замещения погружных асинхронных двигателей // Промышленная энергетика. 2012. Вып. № 1. С. 38 – 41.

12. Ковалёв Ю. З., Ковалёв В. З., Щербаков А. Г., Чертов Р. А. Идентификация параметров математических моделей электротехнических комплексов. М.: ВНИИЦ, 2001. № 50200100259.

13. Эйкхофф П. Основы идентификации систем управления. М.: Мир, 1975. 683 с.

14. Ковалёв В. З., Щербаков А. Г. Информационная система идентификации параметров математических моделей электротехнических комплексов // Системы управления и информационной технологии. 2009. № 1 (35). С. 57 – 59.

15. Щербаков А. Г. Методика идентификации параметров асинхронных двигателей // Омский научный вестник. 2011. № 1 (97). С. 112 – 116.

КОВАЛЁВ Владимир Захарович, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Энергетика».

Адрес для переписки: scherbacov@yandex.ru

ЩЕРБАКОВ Александр Геннадиевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Энергетика».

Адрес для переписки: scherbacov@yandex.ru

ПЕТУХОВА Ольга Анатольевна, кандидат физико-математических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Высшая математика».

Адрес для переписки: o_petuhova@ugrasu.ru

ЗЯБКИН Александр Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Энергетика».

Адрес для переписки: scherbacov@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 31.08.2017 г.

© В. З. Ковалёв, А. Г. Щербаков, О. А. Петухова, А. А. Зябкин