

УДК 621.51. (621.313)

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОМПАЖА ТУРБОКОМПРЕССОРА
НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИВОДНОГО
ДВИГАТЕЛЯ**
**STUDY ON THE IMPACT OF THE SURGE OF TURBOCHARGER
ON THE ENERGY CHARACTERISTICS OF THE DRIVE MOTOR**

Пугачёв Емельян Васильевич,докт.техн.наук, профессор. Email: pugachev_ev@em.sibsiu.ru**Pugachyov Yemelyan V.,**

Dr.Sc. (Engineering), Professor

Кипервассер Михаил Вениаминович,канд.техн.наук, доцент. Email: kipervasser2012@yandex.ru**Kipervasser Mikhail V.,**

C.Sc. (Engineering) , Associate Professor

Герасимук Александр Владимирович,аспирант. Email: heavymetal7200@gmail.com**Gerasimuk Aleksandr V.,**

aspirant

Сибирский государственный индустриальный университет, 654007, Россия, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42

Siberian State Industrial University, 42 Kirova st., Novokuznetsk, 654007, Russian Federation

Аннотация. Актуальность работы: турбокомпрессоры широко применяются в промышленности и, в частности, на предприятиях горнодобывающей отрасли. Мощность приводных синхронных двигателей может достигать 12,5МВт и выше, а частота вращения рабочих колёс до 30000об/мин. Оборудование компрессорных станций работает в условиях периодического осмотра дежурным персоналом. Существующие технологические защиты контролируют ограниченный набор параметров, контроль которых не является достаточным для быстрого, оперативного выявления аварийных ситуаций таких как: осевой сдвиг вала турбины, нецилиндричность шейки валов, нарушение центровки валов, дефекты зубчатых соединений редуктора и соединительных муфт. Поэтому неисправности выявляются с запаздыванием, что усложняет контроль за их развитием. В таких условиях наиболее целесообразны косвенные методы контроля и защиты.

Цель работы: Исследование переходного процесса в цепи тока синхронного электродвигателя турбокомпрессора при дефекте мультипликатора.

Методы исследования: математическое моделирование в среде Matlab.

Результаты: При дефекте (поломке) зубьев мультипликатора турбокомпрессора в цепи тока электродвигателя появляются высшие гармоники. Величина колебания тока составляет порядка 4А, что позволяет зафиксировать его стандартными методами измерений и диагностировать аварийную ситуацию.

Таким образом, контролируя электрические параметры цепи приводного электродвигателя можно диагностировать возникновение аварийной ситуации в турбокомпрессоре на ранней стадии, и тем самым минимизировать последствия аварии.

Abstract.

The urgency of the discussed issue: turbochargers are widely used in industry and, in particular, in the mining industry. Power drive synchronous motors can reach 12,5MW above, and speed impellers to 30000 rpm. Compressor stations operated under periodic inspection personnel on duty. Existing technological protection control limited set of parameters, control of which is not sufficient for fast, rapid identification of emergency situations such as axial displacement of the turbine shaft, gear defects gear connections and couplings. Therefore, faults are detected with delay, which complicates the monitoring of their development. In such circumstances, the most suitable indirect methods of control and protection.

The main aim of the study: To investigate the transition process in the current circuit of the synchronous motor with the turbocharger defect multiplier.

The methods used in the study: mathematical modeling in Matlab Simulink.

The results: When a defect (damage) turbocharger teeth multiplier circuit motor current harmonics appear. The magnitude of current fluctuations is about 4A, which allows it to fix the standard methods of measurement and diagnosis of fault conditions.

Thus, by controlling the electrical parameters of the circuit of the drive motor can be diagnosed occurrence of emergency in the turbocharger at an early stage, and thereby minimize the consequences of the accident.

Ключевые слова: турбокомпрессор, переходный процесс, дефект, мультипликатор, синхронный двигатель.

Key words: turbocharger, transient defect multiplier synchronous motor.

Помпажем принято называть нестабильную работу компрессорной техники, вследствие чего возникают резкие скачки в давлении и колебания в объемах подачи рабочей среды — газовой или воздушной смеси.

Предпосылками для возникновения помпажа является высокая разница давлений на всасывающем и нагнетательном трубопроводах [1, 5]. При запуске компрессора давление в области нагнетания лавинообразно нарастает, в то время как во всасывающей камере — резко падает. В определенный момент может возникнуть ситуация, при которой сила сопротивления рабочей смеси будет превышать усилие, развиваемое компрессором, в результате чего направление движения газов изменится на противоположное. То есть помпаж воздуходувки сопровождается обратным ходом рабочей смеси («заброс» рабочей смеси). Так называемая «граница помпажа» имеет место у каждого компрессора, поэтому при определенных условиях может возникать резонанс, вследствие которого возникнет помпаж. Риск появления резонансов выше в системах, в которых нагнетание создается несколькими машинами, работающими на одну сеть. Помпаж компрессора — явление циклическое: спад сменяется нарастанием. Преодолев так называемую «точку помпажа», компрессор вновь наращивает давление. Цикл повторяется до тех пор, пока силы нагнетания не превысят сопротивление. Как только это произойдет, помпаж турбокомпрессора или воздуходувки прекращается.

При помпаже обычные многоступенчатые и одноступенчатые турбокомпрессоры начинают сильно вибрировать и нагреваться. Вследствие неупорядоченного движения газа, возникают посторонние шумы, вызванные нештатной работой механизма. Электродвигатель, мультипликатор и детали рабочих колёс подвергаются ударным нагрузкам. В целом, помпаж является аварийной ситуацией, приводящей к ускоренному износу элементов компрессора, а нередко — становится причиной выхода из строя компрессорной техники, запорной арматуры и трубопроводов.

С целью минимизации риска возникновения помпажа, магистрали и компрессоры защищаются с помощью специальных устройств и приспособлений: перепускных клапанов, байпасов, дросселей, а также производится постоянный мониторинг работы компрессорного оборудования [8].

Для анализа режима работы турбокомпрессора

и оценивания помпажных явлений целесообразно использовать косвенный метод, основанный на контроле тока статора приводного двигателя компрессора [9]. Так как помпаж представляет процесс колебания давления в турбокомпрессоре и нагнетающем трубопроводе, то колебаться будет и нагрузка на валу двигателя, а, следовательно, в токе будут появляться высшие гармоники или колебания его амплитуды, которые можно фиксировать.

Для моделирования переходного процесса в цепи тока статора приводного двигателя турбокомпрессора требуется создать модель этого двигателя (в рассматриваемом случае — синхронный двигатель СТД-1600), питающей сети, мультипликатора, турбокомпрессора, а также физических явлений, сопровождающих возникновение помпажа в компрессоре. Таковыми являются колебания нагрузки на валу двигателя. Эти колебания имеют периодический характер, но описать их однозначно какой-либо периодической функцией не представляется возможным так как не существует точного математического описания явления помпажа. В рассматриваемом случае помпаж представляется как синусоидальное колебание давления воздуха с переменной частотой.

Синхронная машина с демпферными обмотками с достаточной для практики точностью описывается следующей системой дифференциальных уравнений [6]:

$$\left. \begin{aligned} 1. U_a &= \frac{d\psi_a}{dt} + r_1 i_a; \\ 2. U_b &= \frac{d\psi_b}{dt} + r_1 i_b; \\ 3. U_c &= \frac{d\psi_c}{dt} + r_1 i_c; \\ 4. U_f &= \frac{d\psi_f}{dt} + r_f i_f; \\ 5. 0 &= \frac{d\psi_{yd}}{dt} + r_{yd} i_{yd}; \\ 6. 0 &= \frac{d\psi_{yq}}{dt} + r_{yq} i_{yq}; \\ 7. M &= M_c + J \frac{d\omega}{dt}; \\ 8. d\gamma/dt &= \omega, \end{aligned} \right\} (1)$$

где U_a, U_b, U_c — напряжения на зажимах обмотки статора; $\psi_a, \psi_b, \psi_c, i_a, i_b, i_c$ — соответственно потокосцепления и токи обмоток фаз статора; r_1 — ак-

тивное сопротивление обмотки фазы статора; U_f – напряжение на зажимах обмотки возбуждения; Ψ_f , i_f – потокосцепление и ток обмотки возбуждения; r_f – активное сопротивление обмотки возбуждения; Ψ_{yd} , Ψ_{yq} , i_{yd} , i_{yq} – соответственно потокосцепления и токи демпферных обмоток по продольной и поперечной осям соответственно; r_{yd} , r_{yq} – активное сопротивления демпферной обмотки по продольной и поперечной осям; M – электромагнитный момент, M_c – момент сопротивления нагрузки, J – момент инерции вращающихся масс, γ – угловое положение ротора.

Первые три уравнения системы описывают равновесия обмоток статора.

Четвертое, пятое, шестое соответственно представляют уравнения равновесия обмотки возбуждения и демпферных обмоток по продольной и поперечной осям. При строгом описании состояния демпферных обмоток должно быть столько уравнений, сколько физически имеется стержней демпферной обмотки в полюсах машины. Если же не ставится цель вычисления тока в отдельных стержнях, то их можно заменить одним по продольной и одним по поперечным осям.

Седьмое уравнение – описывает механическую часть машины.

Последнее уравнение – описывает угловое положение ротора.

Система уравнений (1) даёт исчерпывающее описание синхронной машины при анализе статических и динамических процессов, однако её решение связано с большими вычислительными сложностями, так как уравнения состояния статорных обмоток являются периодическими функциями угла поворота ротора и не имеют общих решений [2].

В связи с вышеизложенным, для моделирования синхронных машин удобно использовать другой подход, основанный на переходе от неподвижных координат a , b , c статорных к вращающимся координатам d , q ротора, при этом, координатные оси жестко связаны с ротором.

Указанная модель на основе “двухфазных уравнений” вместе с тем имеет недостаток в виде неточного описания переходных процессов при неполнофазных режимах работы [2].

Уравнения перехода от системы координат (a , b , c) к системе (d , q) имеют вид:

$$\begin{cases} i_d = \frac{2}{3} [i_a \cos \gamma + i_b \cos(\gamma - 2\pi/3) + i_c \cos(\gamma + 2\pi/3)], \\ i_q = -\frac{2}{3} [i_a \sin \gamma + i_b \sin(\gamma - 2\pi/3) + i_c \sin(\gamma + 2\pi/3)]. \end{cases} \quad (2)$$

Система уравнений для потокосцеплений обмоток описывается:

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + L_{afd} i_f + L_{ayd} i_{yd}; \\ \psi_q = L_q i_q + L_{ayq} i_{yq}; \\ \psi_f = (3/2) L_{fad} i_d + L_f i_f + L_{fyd} i_{yd}; \\ \psi_{yd} = (3/2) L_{yda} i_a + L_{ydf} i_f + L_{yda} i_{yd}; \\ \psi_{yq} = (3/2) L_{yqa} i_a + L_{yq} i_{yq}, \end{cases} \quad (3)$$

где L_d , L_q – индуктивность статорной обмотки по продольной и поперечной осям; $L_{afd} = L_{afd}$ – взаимная индуктивность фазы a обмотки статора и обмотки возбуждения при совпадении их магнитных осей; L_{ayd} , L_{ayq} – взаимная индуктивность демпферной обмотки по продольной и поперечной осям с обмоткой фазы a статора при совпадении их магнитных осей

Система уравнений, описывающая работу синхронного двигателя в динамических режимах координатах d , q , имеет вид:

$$\begin{cases} U_d = \frac{d\psi_d}{dt} - \omega \psi_q + r_1 i_d \\ U_q = \frac{d\psi_q}{dt} - \omega \psi_d + r_1 i_q \\ U_f = \frac{d\psi_f}{dt} + r_f i_f \\ 0 = \frac{d\psi_{yd}}{dt} + r_{yd} i_{yd} \\ 0 = \frac{d\psi_{yq}}{dt} + r_{yq} i_{yq} \\ M = M_c + J \frac{d\omega}{dt} \\ M = \psi_d i_q - \psi_q i_d \\ \omega_1 - \omega = \frac{d\theta}{dt} \end{cases} \quad (4)$$

Система уравнений (4) достоверно описывает работу синхронного двигателя при различных условиях питания и применима к рассматриваемому случаю, при неизменном питающем напряжении и частоте тока.

Матрицы векторов потокосцеплений, токов и индуктивностей запишутся в виде:

$$\bar{\Psi} = \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_f \\ \psi_{yd} \\ \psi_{yq} \end{bmatrix}; \quad \bar{I} = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_{yd} \\ i_{yq} \end{bmatrix}; \quad \bar{L} = \begin{bmatrix} L_d & 0 & L_{ad} & L_{ad} & 0 \\ 0 & L & 0 & 0 & L_{aq} \\ L_{ad} & 0 & L_f & L_{ad} & 0 \\ L_{ad} & 0 & L_{ad} & L_{yd} & 0 \\ 0 & L_{aq} & 0 & 0 & L_{yq} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Токи статорных обмоток определяются из векторного уравнения:

$$\bar{\Psi} = \bar{I} \times \bar{L} \quad (6)$$

Для нахождения токов статора i_a , i_b , i_c , используются уравнения обратного перехода от системы

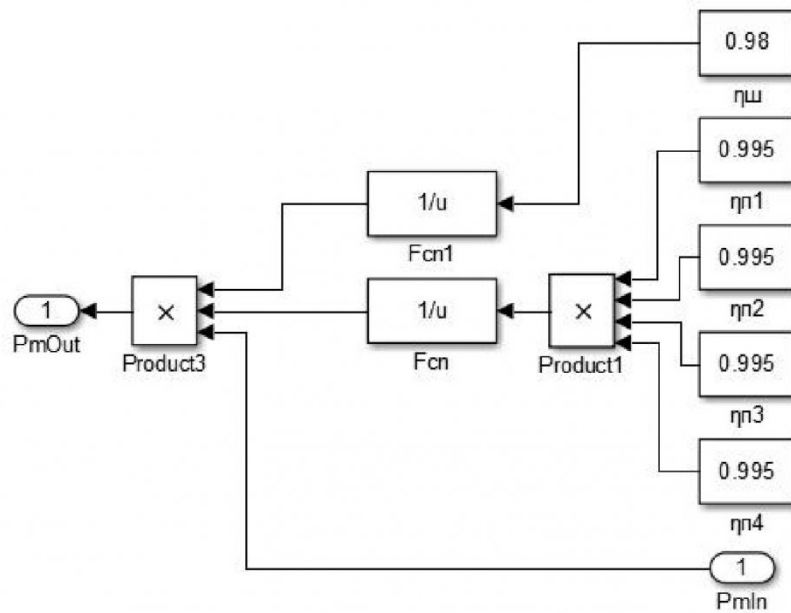


Рис. 1. Функциональная структура блока моделирования мультипликатора

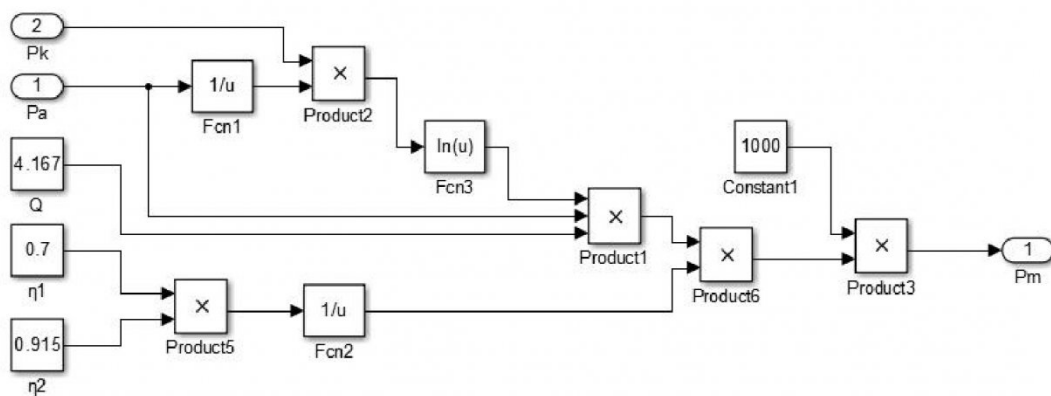


Рис. 2. Функциональная структура блока моделирования турбокомпрессора

координат (d, q) к системе координат (a, b, c):

$$\begin{cases} i_a = i_d \cos \gamma - i_q \sin \gamma \\ i_b = i_d \cos(\gamma - 2\pi/3) - i_q \sin(\gamma - 2\pi/3) \\ i_c = i_d \cos(\gamma + 2\pi/3) - i_q \sin(\gamma + 2\pi/3) \end{cases} \quad (7)$$

В качестве среды моделирования использовался программный комплекс Matlab Simulink. Уравнения (2) – (7) реализованы в стандартном блоке имитации синхронного двигателя [3]. Так как исследуемый двигатель неявнополюсный, то параметры для осей d и q задаются одинаковыми. Для упрощения анализа переходного процесса принимается, что турбокомпрессор питается от системы электроснабжения неограниченной мощности.

Мультипликатор компрессорной установки обычно выполняется одноступенчатым, с шевронной цилиндрической передачей. Упрощенно мультипликатор может быть представлен выражением [11]:

$$N_K = \frac{N_K}{\eta_{ш} \eta_{п}^n}, \quad (8)$$

где N_K – механическая мощность, которую необходимо подвести к турбокомпрессору от приводного двигателя при номинальных условиях работы, МВт; $\eta_{ш}$ – КПД шевронной передачи; $\eta_{п}$ – КПД подшипников качения; n – количество подшипников качения в мультипликаторе.

Реализация функциональной структуры мультипликатора представлена на рис.1.

Модель турбокомпрессора может быть представлена выражением, определяющим механическую мощность, которую необходимо подвести к турбокомпрессору от двигателя:

$$N_K = \frac{P_{АТМ} Q_K}{\eta_{ИЗ} \eta_M} \ln \left(\frac{P_K}{P_{АТМ}} \right), \quad (9)$$

где $\eta_{ИЗ}$ – изотермический КПД; η_M – механический КПД; $P_{АТМ}$ – атмосферное давление, кПа; $P_K = P_{Кузб} + P_{АТМ}$ – конечное давление воздуха на выходе из турбокомпрессора, кПа; Q_K – производи-

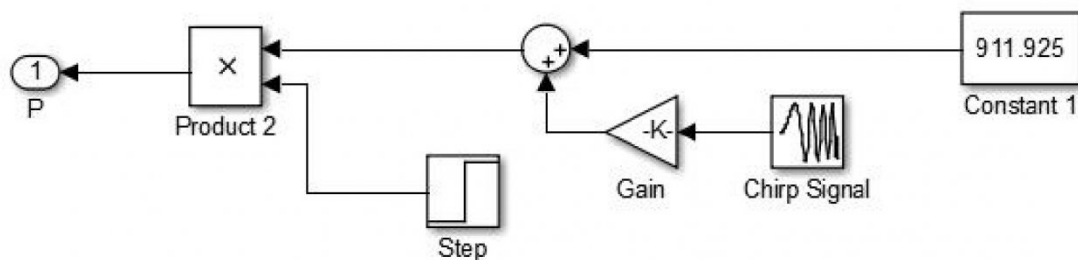


Рис. 3. Функциональная структура блока имитации давления в нагнетающем трубопроводе турбокомпрессора в следствии помпажного эффекта

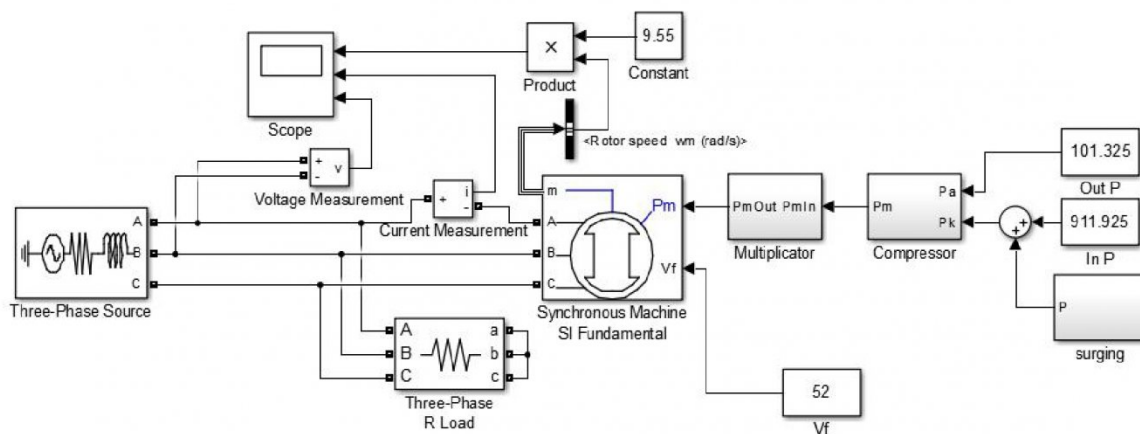


Рис. 4. Функциональная структура математической модели компрессорной установки и питающей сети

тельность турбокомпрессора, м³/с.

Реализация функциональной структуры турбокомпрессора представлена на рис. 2.

Помпаж, как уже было сказано выше, можно охарактеризовать как процесс колебания давления (напора) в нагнетающем трубопроводе турбокомпрессора, который можно приближенно описать гармонической функцией синусоидально вида с переменной частотой.

Реализация в Simulink эффекта наброса нагрузки на вал двигателя от помпажного эффекта в виде функциональной схемы показана на рис. 3.

Элемент «Chirp Signal» реализует синусоидальный сигнал переменной частоты с амплитудой равной 1. Элемент «Gain» усиливает сигнал до требуемой величины. Элемент умножения «Product 2» и элемент ступенчатого сигнала «Step» имитируют момент времени возникновения помпажа. Начальные значения ступенчатого сигнала рано 0, а в задаваемый момент времени – 1.

Схема модели компрессорной установки и питающей сети приведена на рисунке 4:

Модель собрана из стандартных блоков библиотек Simulink. Номинальное давление воздуха в нагнетающем трубопроводе турбокомпрессора имитируется элементом «Out P», а давление на входе в турбокомпрессор, равное атмосферному, задаётся элементом «In P». Колебание давления в нагнетающем трубопроводе в следствии помпажного эффекта имитируется суммированием постоянного значения номинального давления турбо-

компрессора и колебательной составляющей от блока имитации помпажа.

Моделирование производилось для компрессорной установки К-250 с синхронным неявнополюсным двигателем СТД-1600 мощностью 1600 кВт [4]. Помпаж моделируется синусоидальным колебанием давления в нагнетающем трубопроводе компрессора с частотой, изменяемой от 2 до 30 Гц и амплитудой равной трёхкратному номинальному давлению (номинальное давление составляет 911,925кПа, [7]). На рисунках 5 и 6 приведены диаграммы тока статора и скорости вращения ротора синхронного двигателя, полученные в процессе моделирования помпажа турбокомпрессора.

Анализ диаграммы тока свидетельствует о том, что при помпаже происходят колебания как амплитуды тока статора, так и частоты этих колебаний. При частотах колебаний от 2 до 12 Гц амплитуда колебаний может достигать 1,7 крат номинального рабочего тока, что в свою очередь позволяет зафиксировать его стандартными методами измерений и, тем самым, диагностировать ненормальный режим работы.

При помпаже на частотах 13 – 30 Гц амплитуда колебаний падает до значения 1,44 крат номинального рабочего тока. При данных частотах колебаний газовой струи целесообразно использовать гармонический анализ составляющих тока статора, результаты которого также будут зависеть от возникающих при помпаже явлений.

Анализ диаграммы скорости СД свидетель-

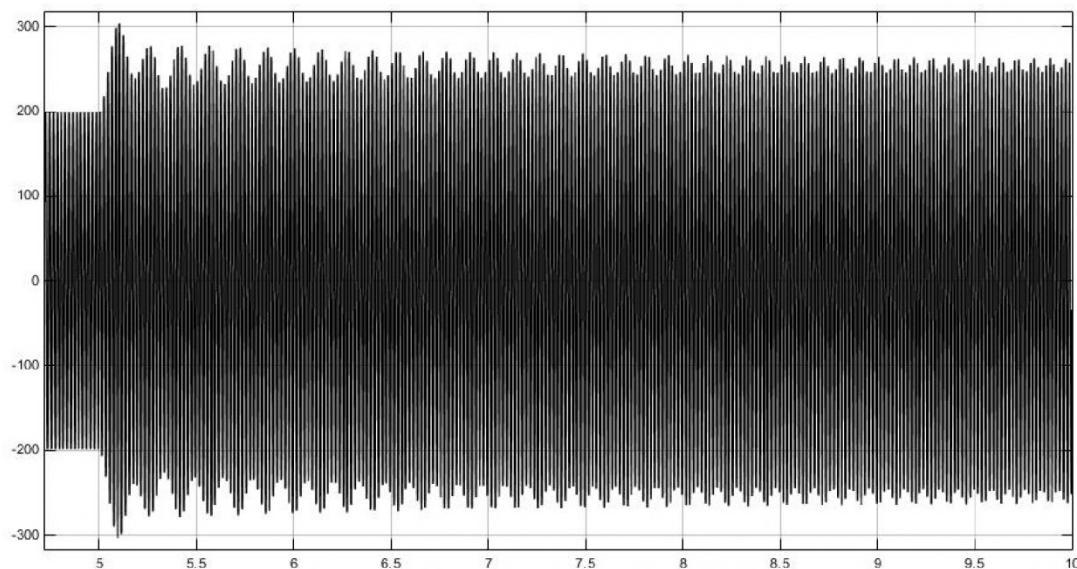


Рис. 5. Диаграмма тока в фазе приводного двигателя при моделировании явления помпажного эффекта с частотой от 2 до 30 Гц.

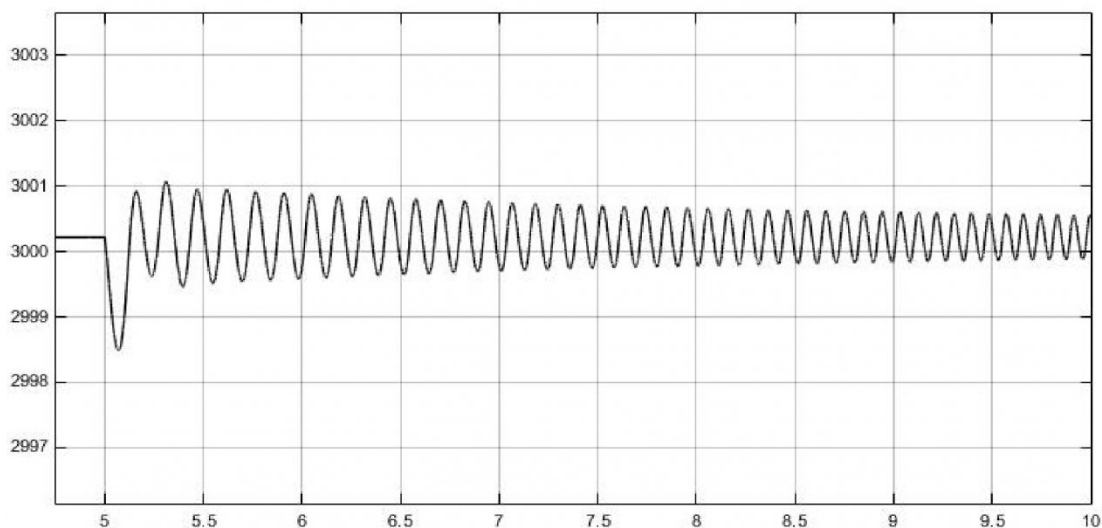


Рис. 6. Диаграмма частоты вращения приводного двигателя при моделировании явления помпажного эффекта с частотой от 2 до 30 Гц.

ствует о небольших колебаниях частоты вращения синхронного двигателя при помпаже турбокомпрессора. Амплитуда колебаний частоты вращения двигателя по мере роста частоты колебаний давления газа уменьшается. Амплитудное значение колебаний частоты вращения составляет 0.05% от номинальной.

Таким образом, анализ изменения тока статора приводного электродвигателя может быть использован в системе автоматической мониторинга режимов работы турбокомпрессора для формирования команды на антипомпажные устройства для защиты механической части турбокомпрессорной установки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Б. Эккерт. Осевые и центробежные компрессоры. Пер.с нем. / Пер. Фролов Е.С., Захаров Б.Д. - М.: Гос.науч.-техн.изд-во машиностроит.лит., 1959. - 678 с.
2. Электрические машины (специальный курс) / Г.А. Сипайлов [и др.]. - М.: Высшая школа, 1987. - С. 77-88.
3. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MatLab, SimPowerSystems и Simulink. - СПб.: Питер, 2007. - С. 11-34
4. Техническое описание - Компрессоры К500-61-1(2), К350-62-1, К250-61-1(2). М.: ТЕХМАСНЕХПОРТ, 2007. - 22 с

5. Теверовский Б.З., Даничек Е.А. Компрессорные машины, Днепропетровск, 1966, 150 с.
6. Горев, А. А. Переходные процессы синхронных генераторов / А. А. Горев. - М.: ГЭИ, 1960. - 551с.
7. Пугачёв Е.В., Кипервассер М.В., Герасимук А.В. Исследование переходного процесса в цепи тока приводного электродвигателя при аварии турбокомпрессора. Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2015. № 2 (12). С. 45-48.
8. <http://www.blowers.ru>
9. Савельев А.Н. Кипервассер М.В. Аниканов Д.С. К обоснованию комплексного метода оценки степени работоспособности современных технологических объектов. Известия вузов. Черная металлургия. – 2012. - № 12. – С. 37 – 41.
10. Быстрицкий Г.Ф. Основы энергетики: учебник / Г. Ф. Быстрицкий. — 3-е изд., стер. — М.: КНО-РУС, 2012. — 352 с.
11. Тюняев А. В., Звездаков В. П. Детали машин: Учебник. 2-е изд., испр. и доп. — СПб.: Издательство «Лань», 2013. — 736 с.: ил. — (Учебники для вузов. Специальная литература).

REFERENCES

1. B. Jekkert. Osevye i centrobezhnye kompressory. Per.s nem. / Per. Frolov E.S., Zaharov B.D. - М.: Gos.nauch.-tehn.izd-vo mashinostroit.lit., 1959. - 678 s.
2. Jelektricheskie mashiny (special'nyj kurs) / G.A. Sipajlov [i dr.]. – М.: Vysshaja shkola, 1987. – S. 77–88.
3. Chernyh I.V. Modelirovanie jelectrotehnicheskikh ustrojstv v MatLab, SimPowerSystems i Simulink. – SPb.: Piter, 2007. – S. 11–34
4. Tehnicheskoe opisanie - Kompessory K500-61-1(2), K350-62-1, K250-61-1(2). М.: TECHMASHEX-PORT, 2007. - 22 s
5. Teverovskij B.Z., Danichek E.A. Kompessornye mashiny, Dnepropetrovsk, 1966, 150 s.
6. Gorev, A. A. Perehodnye processy sinhronnyh generatorov / A. A. Gorev. - М.: GJeI, 1960. - 551s.
7. Pugachjov E.V., Kipervasser M.V., Gerasimuk A.V. Issledovanie perehodnogo processa v cepi toka privodnogo jelektrodvigatelja pri avarii turbokompessora. Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta. 2015. № 2 (12). S. 45-48.
8. <http://www.blowers.ru>
9. Savel'ev A.N. Kipervasser M.V. Anikanov D.S. K obosnovaniju kompleksnogo metoda ocenki stepeni rabotosposobnosti sovremennyh tehnologicheskikh ob#ektov. Izvestija vuzov. Chernaja metallurgija. – 2012. - № 12. – S. 37 – 41.
10. Bystrickij G.F. Osnovy jenergetiki: uchebnik / G. F. Bystrickij. — 3-е изд., стер. — М.: KNORUS, 2012. — 352 с.
11. Tjunjaev A. V., Zvezdakov V. P. Detali mashin: Uchebnik. 2-е изд., ispr. i dop. — SPb.: Izdatel'stvo «Lan'», 2013. — 736 s.: il. — (Uchebniki dlja vuzov. Special'naja literatura).

Поступило в редакцию 11 .11.2015
Received 11 November 2015