Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

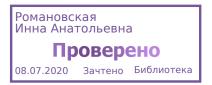
На правах рукописи

Мирзоев Бобур Носирович

Исследование автономного источника напряжения стабильной частоты

Направление подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ



Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

Научный руководитель кандидат технических наук,

профессор кафедры Суздорф

Виктор Иванович

Рецензент кандидат технических наук,

директор учебно-

производственного центра КГА ПОУ «Губернаторский авиастроительный колледж»

Киница Олег Игоревич

Защита состоится «29» июня 2020 года в _09_ часов _00_ мин на заседании государственной экзаменационной комиссии по направлению подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» в Комсомольском-на-Амуре государственном университете по адресу: 681913, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27.

Автореферат разослан ____ июня 2020 г.

Секретарь ГЭК

А.В. Бузикаева

Актуальность темы. Развитие материальной культуры человеческого общества в современном мире определяется созданием различных устройств генерирования, преобразования, потребления н использования электроэнергии. Среди задач преобразования электрической энергии важное место занимает проблема получения стабильной частоты и амплитуды выходного напряжения в автономных системах, работающих при переменных частотах вращения первичного двигателя.

На сегодняшний день современная промышленность нуждается в получении неизменного по качеству переменного тока к напряжениям. Особенно это необходимо в тех отраслях промышленности, где повторяемость и точность является основополагающим элементом создания качественной продукции. Колебания, отклонения частоты тока и напряжения питания нагрузки наносят убытки потребителям, причиной которых является выход из строя дорогостоящего оборудования.

Широко применяющиеся в настоящее время автономные источники не в полной мере удовлетворяют все возрастающим требованиям к качеству и надежности, сроку службы, статическим и динамическим показателям автономных систем электроснабжения.

Принимая во внимание возрастающие требования к качеству поставляемой электроэнергии, актуальной является разработка новых автономных источников, обеспечивающих высокое качество выходного напряжения.

Целью работы является исследование автономного источника напряжения стабильной частоты.

Методика исследования. Научные исследования в диссертационной работе основывались на применении методов теории электромеханического преобразования энергии, теории дифференциальных уравнений, теории автоматического управления. При решении задач исследования динамических режимов системы, определении структуры и параметров предложенных

моделей использовались методы цифрового моделирования на основе пакета Matlab.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- разработано новое техническое решение построения автономного источника напряжения стабильной частоты, обеспечивающее высокое качество выходного напряжения в широком диапазоне изменения частоты вращения приводного вала;
- разработана математическая модель источника, учитывающая особенности работы вентильного преобразователя;
- предложена коррекция законов управления вентильным преобразователем с учетом модуляции напряжения, позволяющих повысить качественные показатели выходного напряжения;
- выявлены особенности работы вентильного преобразователя с модуляцией напряжения генератора автономного источника стабильной частоты;
- в результате теоретических исследования выработаны новые рекомендации по проектированию автономных источников стабильной частоты модуляционного типа.

Основные положения, выносимые на защиту:

- новое техническое решение построения автономных источников переменного напряжения стабильной частоты;
- цифровая модель автономного источника переменного напряжения стабильной частоты на основе использования интегрированной программной среды Matlab;

Практическая ценность работы:

- разработано и исследовано новое техническое решение автономного источника напряжения стабильной частоты обеспечивающее высокое качество выходного напряжения н хорошие эксплуатационные показатели;
 - разработаны рекомендации по выбору параметров генератора;

- исследованы режимы работы вентильного преобразователя частоты необходимые для расчетов автономного источника на этапе проектирования;
- предложена коррекция законов управления НПЧ улучшающая качество кривой выходного напряжения;
- разработана математическая модель, учитывающая особенности источников энергоснабжения данного типа и позволяющая исследовать переходные и установившиеся процессы в источнике при несимметричной и симметричной нагрузке.

Публикации. По результатам исследований, отраженных в диссертации опубликовано 2 научных работ.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех разделов и заключения, изложенных на 106 страницах машинописного текста, списка литературы из 37 наименований.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, дана общая характеристика научной проблемы, поставлена цель и намечен круг решаемых задач, показана научная новизна. Приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе произведен анализ известных и разработка нового автономного источника напряжения стабильной частоты.

Анализ существующих источников типа «переменная частотапостоянная скорость» с вентильным преобразователем, включенным в якорную цепь генератора выявил ряд очевидных недостатков.

Поиск наиболее экономичных источников, обладающих высокими энергетическими характеристиками в широком диапазоне изменения частоты вращения вала генератора, привел к необходимости создания автономного источника на основе электромашинного формирования кривой выходного напряжения. По принципу формирования напряжения, рассматриваемые источники можно разделить на две группы:

- 1. Источники с модуляцией напряжения электромашинного генератора посредством изменения магнитного потока
- 2. Источники с формированием напряжения электромашинного генератора путем сложения ЭДС близких частот

Источники с пульсирующим магнитным потоком генератора обладают рядом недостатков, ограничивающих область применения устройств данного типа. К этим недостаткам относится зависимость гармонического состава выходного напряжения от частоты вращения вала. генератора, низкие энергетические показатели, обусловленные значительными потерями в цепи возбуждения. В связи с чем их применение не целесообразно при большом возбуждения отношении частот вращения И генератора. перспективными техническими решениями получения стабильной частоты на основе электромашинного формирования кривой выходного напряжения являются источники формированием напряжения электромашинного генератора путем сложения ЭДС близких частот.

С целью решения поставленной задачи автором предложено новое техническое решение автономного источника напряжения стабильной частоты (АИСЧ). Схема АИСЧ (рисунок 1) состоит из синхронного генератор (СГ) и асинхронного возбудителя (АВ) расположенных на одном валу м выполнены в одном корпусе. Обмотки электрических машин, составляющих генератор выполнены с различным числом пар полюсов, что позволяет обеспечивать в результате выделения огибающей выходного напряжения с помощью преобразователя частоты с непосредственной связью (НПЧ), независимость частоты биений от частоты вращения вала. Обмотка возбуждения синхронного генератора подключена к роторной обмотке АВ через управляемый выпрямитель (УВ). Статорная обмотка АВ подключена к автономному инвертору. На роторе синхронного генератора уложена трехфазная дополнительная обмотка, подключенная к роторной обмотке АВ. Выходная якорная обмотка. Синхронного генератора заполнена з виде трех

однофазных обмоток с полным шагом, сдвинуты и пространстве на угол $\frac{2\pi}{3}$ эл. градусов.

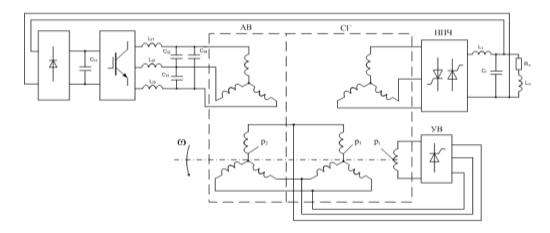


Рисунок 1— Функциональная схема автономного однофазного источника Достоинством данного устройства является совмещение в одном магнитопроводе машин различной полярности, что позволяет обеспечить отсутствие скользящих контактов и повысить надежность системы.

Введение дополнительных элементов, работающих в цепи обратной связи обеспечивает условия возбуждения генератора, стабилизацию частоты и амплитуды выходного напряжения по двум каналам: регулирования возбуждения преобразователя. цепи вентильного Возможность И регулирования глубины модуляции напряжения в широких позволяет получить хорошие энергетические показатели источника при высоком качестве формы выходного напряжения.

Во второй главе рассмотрены особенности работы НПЧ, сформулированы, принципы коррекции закона управления НПЧ в источнике с модуляцией напряжения, проведен гармонический анализ напряжения питания нагрузки.

В АИСЧ нагрузка подключена к электромашинному генератору через полупроводниковый преобразователь. Этот узел представляет собой нелинейное звено, оказывающее значительное влияние на электромагнитные процессы в машинно-вентильном источнике.

Управление преобразователем осуществляется с раздельным управлением вентильными комплектами н прямоугольным законам управления вентилями.

В результате проведенных исследований установлено, что в течение одного полупериода изменения тока нагрузки могут иметь место три режима работы вентильного преобразователя. Границы режимов (рисунок 2 а, б) работы определяются степенью загрузки преобразователя, величиной коммутационного сопротивления (X_{κ}) фазной обмотки генератора, глубиной амплитудной модуляции (k) напряжения генератора и $cos(\varphi_{\mu})$

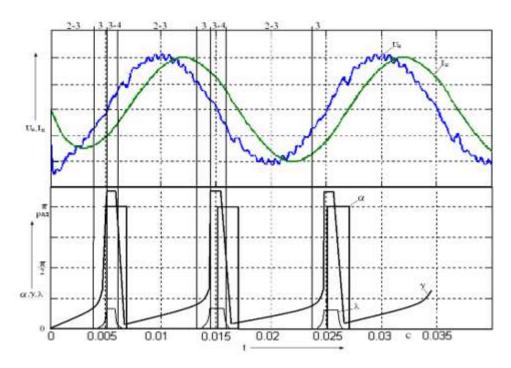


Рисунок 2 – Режим работы НПЧ при: a) X_{κ} =0.3; k=1; $cos(\varphi_{_H})$ =0.8

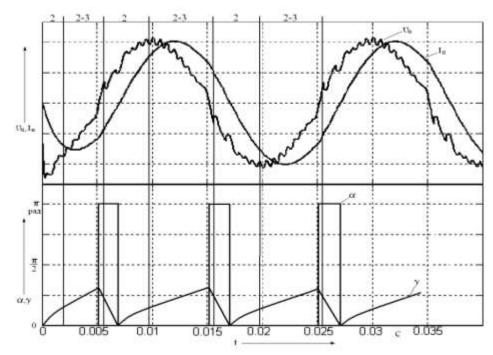


Рисунок 2 – Режимы работы НПЧ при: б) X_{κ} =0.3; k=0.6; $cos(\varphi_{H})$ =0.8

Наиболее «глубокий» и неблагоприятный режим работы, а именно 3-4 вентильный возникает при k=1, $X_{\kappa}=0.3$ т.е,номинальной нагрузки с $cos(\varphi_H)$ =0.8. Исключение «глубоких» режимов возможно путем изменения глубины модуляции, а также при $X_{\kappa}=0$. Это условие может быть выполнено путем, введения емкости в первичную цепь вентильного преобразователя, однако улучшение работы преобразователя возможно в узком диапазоне вращения вала. С уменьшение глубины амплитудной модуляции ухудшается качество выходного напряжения.

С целью повышения качества выходного напряжения предложена коррекция законов управления вентильным, преобразователем. Основная Идея заключается' во введении замкнутого контура в систему управления с целью отслеживания выходного сигнала и учета глубины амплитудной модуляции с учетом частоты вращения вала для формирования запрещающих импульсов на открывание вентилей, позволяющего улучшить форму основной гармоники кривой и уменьшить паразитные составляющее спектров выходного напряжения и тока. На (рисунке 3-4-(5, a, б)) представлены кривые выходного напряжения при различных системах выходного напряжения н

глубине амплитудной модуляции. Напряжение и ток нагрузки при глубине амплитудной модуляции k=0.8

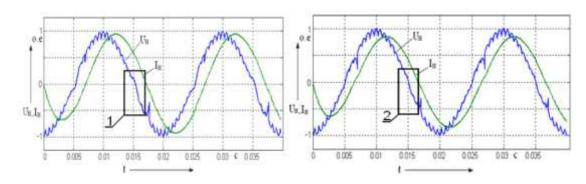


Рисунок 3 – Напряжение и ток нагрузки при различных системах управления

Напряжение и ток нагрузки при глубине амплитудой модуляций k=0.6

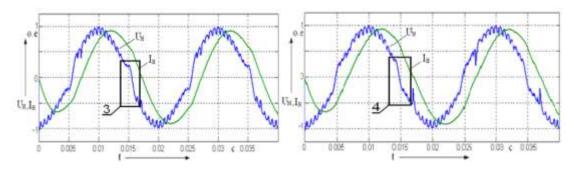


Рисунок 4 – Напряжение и ток нагрузки при различных системах управления

Гармонический состав напряжения питания нагрузки с предложенной коррекцией закона управления НПЧ заметно лучше, на интервале до двукратного отношения частоты вращения вала генератора к выходной частоте напряжения. В частности, при двукратном значении отношения коэффициент не синусоидальности, не превышает установленной величины (5%) при k=0.8

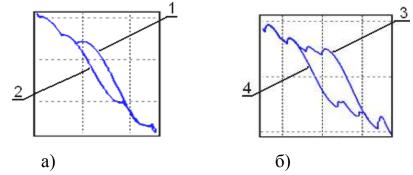


Рисунок 5 – Кривые напряжения: a) при k=0.8; б) при k=0.6

В третьей главе проведено математическое моделирование автономной системы электроснабжения; исследованы процессы в электромашинном генераторе, рассмотрены особенности системы стабилизации выходных электрических параметров.

Электромашинный генератор является неотъемлемой частью и важнейшей частью разработанной автономной системы электроснабжения. Наиболее полную информацию о характере динамических процессов, протекающих в источнике на этапе проектирования возможно получить путем математического моделирования рабочих режимов. С этой целью предложена математическая модель электромашинного генератора учитывающая ряд новых, ранее не рассмотренных, функциональных элементов.

Асинхронный возбудитель, работающий в режиме генератора, описан в работе дифференциальными уравнениями в проекции на оси прямоугольной системы координат, вращающейся с произвольной скоростью.

Возбуждение асинхронного генератора осуществляется по цели обмотки возбуждения переменного тока от автономного инвертора с широтно-импульсной модуляцией напряжения. Система управления представлена в «классическом» варианте, реализующая двухстороннюю модуляцию с симметричным сдвигом обоих фронтов выходных импульсов на полупериодах модуляции с использованием опорного сигнала, общего для всех фаз инвертора.

Для исследования модели синхронного генератора с дополнительно уложенной на роторе трехфазной обмоткой возбуждения и с учетом

отсутствия демпферной обмотки в диссертационной работе предложена система уравнений в ортогональной системе координат d, q, жестко связанной с ротором:

$$U_{d} = r_{s}i_{d} + \frac{d\psi_{d}}{dt} - \omega_{r}\psi_{q}$$

$$U_{q} = r_{s}i_{q} + \frac{d\psi_{q}}{dt} + \omega_{r}\psi_{d}$$

$$U_{rd} = r_{r}i_{rd} + \frac{d\psi_{rd}}{dt}$$

$$U_{rd} = r_{r}i_{rd} + \frac{d\psi_{rd}}{dt}$$

$$U_{rq} = r_{r}i_{rq} + \frac{d\psi_{rq}}{dt}$$

$$U_{rq} = r_{r}i_{rq} + \frac{d\psi_{rq}}{dt}$$

$$U_{f} = r_{f}i_{f} + \frac{d\psi_{f}}{dt}$$

$$\psi_{d} = L_{d}i_{d} + L_{md}i_{f} + L_{md}i_{rd}$$

$$\psi_{q} = L_{q}i_{q} + L_{mq}i_{q} + L_{md}i_{d} + L_{md}i_{rd}$$

$$\psi_{rd} = L_{rd}i_{rd} + L_{md}i_{d} + L_{md}i_{f}$$

$$\psi_{rq} = L_{rq}i_{rq} + L_{mq}i_{q}$$

Для учета изменения скорости вращения вала генератора в систему вводится выражение, учитывающее скорость изменения угла поворота ротора:

$$\frac{d\gamma}{dt} = \omega_r$$

К якорной обмотке СГ подключен тиристорный преобразователь (ТП) математическая модель которого представлена в виде нормальной системы дифференциальных уравнений (НДУ) для мгновенных значений токов и напряжений по числу независимых контуров эквивалентной схемы замещения.

Переход от ортогональной системы к фазной системе координат осуществляется с помощью следующих тригонометрических преобразований:

$$\begin{split} U_{sA} &= \left[U_d \sin(\omega t) + U_q \cos(\omega t) + U_0 \right] \\ U_{sB} &= \left[U_d \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + U_q \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + U_0 \right] \\ U_{sC} &= \left[U_d \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) + U_q \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) + U_0 \right] \end{split}$$

Система (НДУ) описывающая электромагнитные процессы в НПЧ в интервалы коммутации имеет следующий вид:

$$\begin{split} R_{si} & i_{si} + (L_f + L_{si}) \frac{di_{si}}{dt} + i_{vsi} R_{vsi} + L_{vsi} \frac{di_{vsi}}{dt} + i_{hsi} R_{hsi} + U_{chi} + U_{cf} - i_{sj} R_{vsj} - L_{vsj} \frac{di_{sj}}{dt} - i_{hsj} R_{hsj} - U_{chj} - i_{sj} R_{sj} - L_{sj} \frac{di_{sj}}{dt} = U_{si} - U_{sj}; \\ R_{sj} & i_{sj} + L_{sj} \frac{di_{sj}}{dt} + i_{vsj} R_{vsj} + L_{vsj} \frac{di_{vsj}}{dt} + i_{hsj} R_{hsj} + U_{chj} - i_{vsk} R_{vsk} - L_{vsk} \frac{di_{vsj}}{dt} - i_{hsk} R_{hsk} - U_{chk} = 0; \\ & i_{d} R_{d} + L_{d} \frac{di_{d}}{dt} - U_{cf} = 0; \quad i_{si} + i_{cf} + i_{Rf} + i_{d} = 0; \quad i_{hs} R_{hs} + U_{chs} = U_{vs}; \\ & i_{cf} = C_{f} \frac{dU_{cf}}{dt}; \quad i_{Rf} = \frac{U_{cf}}{R_{f}}; \quad \sum_{i} i_{si} = 0; \end{split}$$

$$i = A, B, C; j = A, B, C; k = A, B, C; i \neq j \neq k$$

для межкоммутациокных интервалов

$$j = k$$
; $i = -j$.

Переход от системы, описывающей процессы в меж коммутационном интервале, к системе, описывающей процессы в интервале коммутации, происходит в момент времени, определяемый углом включения тиристоров; обратный переход по спаду до нуля контролируемого в течение интервала коммутации тока через выключаемый тиристор с сохранением значений всех независимых переменных на границе интервалов.

Условия запирания и отпирания вентилей:

$$(i_{vs}(t) = 0) \wedge (\frac{di_{vs}(t)}{dt} < 0) \qquad (U_{vs}(t) > 0) \wedge (F_{vs}(t) = 1)$$

где i_{vs} - ток открытого вентиля;

 $U_{_{\mathit{VS}}}$ - напряжение на закрытом вентиле;

 F_{vs} - управляющая функция вентиля.

Представленное математическое описание автономного источника является наиболее удобным для моделирования с применением пакета Matlab.

Моделирование производилось методом набора и коррекция в стандартных библиотеках в соответствии с приведенными дифференциальными уравнениями и поставленной задачей.

Силовая схема АИСЧ в среде Matlab представлена на рисунке 6

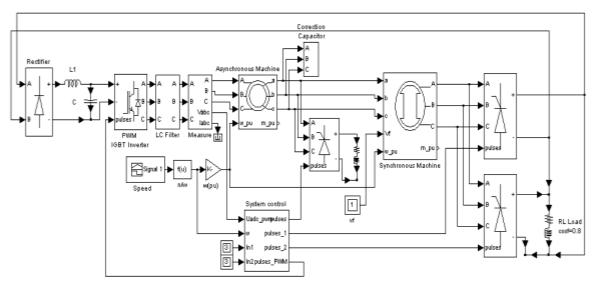


Рисунок 6 – Силовая схема АИСЧ в среде Matlab

Структурная математическая модель синхронного генератора в среде Matlab представ лена на рисунке 7

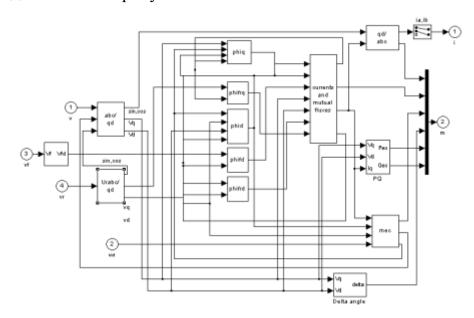


Рисунок 7 — Структурная схема математической модели синхронного генератора

Постановка вычислительного эксперимента позволило исследовать переходный процесс в электромашинном генераторе, который условно разделен на две составляющие «низкочастотную» и «высокочастотную».

В процессе исследования были выявлены параметры и соотношения, влияющие на степень вышеуказанных составляющих. Даны рекомендации для проектирования системы автоматического регулирования с учетом «низкочастотной» составляющей модуляции напряжения генератора.

Разработанная математическая модель позволяет рассматривать особенности стабилизации выходных электрических параметров.

Особенность предложенного автономного источника заключается в том, что формирование кривой выходного напряжения происходит с помощью генератора, а не вентильного преобразователя как в системах синхронный генератор преобразователь частоты. Выявлено, что наиболее перспективным способом регулирования амплитуды выходного напряжения является воздействие на обмотки возбуждения генератора.

Стабилизация выходного напряжения может осуществляться:

- по цепи обмотки возбуждения постоянного токи;
- по цепи обмотки возбуждения переменного тока;
- по цепи преобразователя частоты с непосредствен ной связью;

При этом существует возможность одновременного сочетания с использованием двух или всех каналов управления.

Расчеты производились для различных способов стабилизации выходных параметров при изменении скорости вращения вала генератора и изменения величины нагрузки. Результаты моделирования представлены на (рисунках 8 – 10)

Система регулирования выходного напряжения по цепи обмотки возбуждения постоянного тока

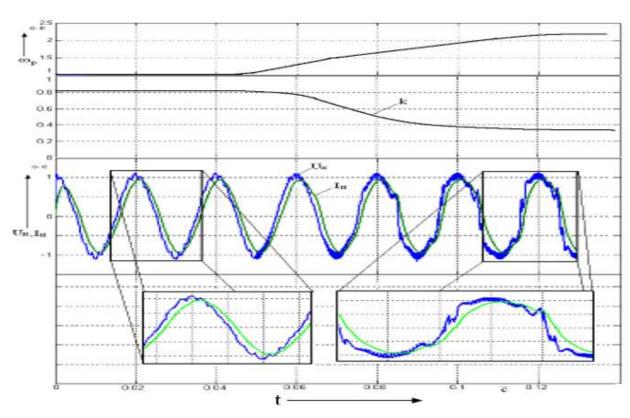


Рисунок 8 — Переходные процессы и тока нагрузки при изменении частоты вращения вала генератора

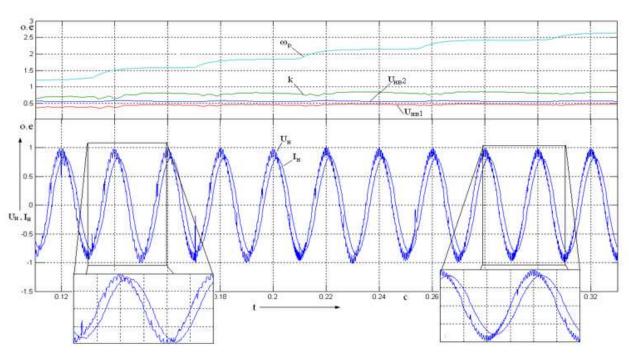


Рисунок 9 — Переходные процессы напряжения и тока нагрузки при изменении частоты вращения вала генератора

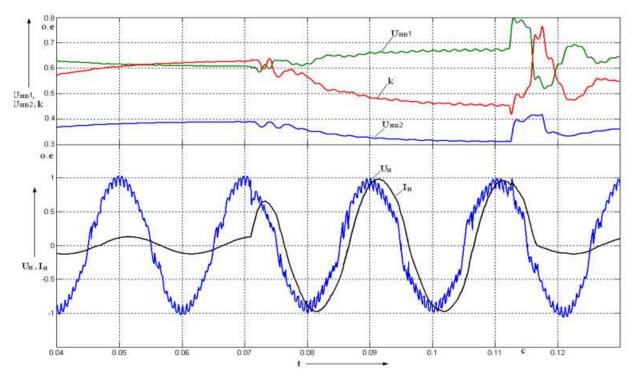


Рисунок 10 – Переходные процессы напряжения и тока нагрузки при изменении величины нагрузки

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Основные результаты и выводы, сделанные в ходе выполнения диссертационной работы:

- 1. При создании автономных источников напряжения стабильной частоты и для малой и средней мощности, для обеспечения высокое качество выходного напряжения в широком диапазоне изменения частоты вращения вала целесообразно применение источников с электромашинным формированием кривой выходного напряжения.
- 2. Предложено новое техническое решение построения автономного машинно-вентильного источника модуляционного типа.
- 3. Предложена коррекция закона управления преобразователем частоты с непосредственной связью при модулированном входном напряжении,

позволяющая улучшить качество кривой выходного напряжения и уменьшить паразитные составляющие спектров выходного напряжения.

- 4. Разработана математическая модель автономного источника модуляционного типа, учитывающая как особенности электромашинного генератора, так и наличие глубоких режимов работы НПЧ и позволяющая исследовать установившиеся, и переходные процессы системы электроснабжения.
- 5. Установлено, что блочно-модульный принцип построения математических моделей упрощает, создание программ и моделей для исследования статических, динамических, симметричных, несимметричных режимов работы для широкого класса автономных источников напряжения стабильной частоты.
- 6. Определены границы режимов работы преобразователя, определяющиеся степенью загрузки НПЧ, $cos(\varphi_H)$, величиной коммутационного сопротивления X_{κ} и глубиной амплитудной модуляции напряжения генератора k.
- 7. Показано существенное влияние на величину «низкочастотной» модуляции магнитного потока реакции якоря параметров X_d , X_κ , k, и, а также величина и характер нагрузки НПЧ.
- 8. Установлено, что цепи возбуждения генератора работают в стационарном режиме, при работе вентильного преобразователя я якорных обмоток генератора в периодически повторяющихся режимах работы, что позволяет проектировать систему автоматического регулирования выходного напряжения без учета «низкочастотной» модуляции напряжения.
- 9. Выявлено, что использование регулирования выходного напряжения по цепи обмотки возбуждения постоянного тока обеспечивает требуемые показатели системы в узком диапазоне частоты вращения вала генератора, по сравнению с комбинированным способом управления.

Основные публикации по теме диссертации:

- 1. Мирзоев Б. Н; Суздорф В. И. кандидат технический наук, профессор; Комсомольский-на-Амуре государственный университет. Исследование автономного источника напряжения стабильной частоты. Материалы II Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых Комсомольск-на-Амуре, 08-12 апреля 2019 г. 338-340с.
- 2. Мирзоев Б. Н, Плотников Е. В; Суздорф В. И. кандидат технический наук, профессор; Комсомольский-на-Амуре государственный университет. Электропривод ленточного конвейера. Материалы II Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых Комсомольск-на-Амуре, 08-12 апреля 2019 г. 341-343с