ИУ-10
Системное
Программное
Обеспечение

Как работает nginx

Москва, 2022

Содержание

Проблемы Apache

Веб-сервер Apache до сих пор занимает видное место в интернете. Корни этого проекта уходят в начало 1990-х годов, и изначально его архитектура была заточена под существовавшие тогда системы и аппаратное обеспечение, а также общую степень развития интернета. Тогда веб-сайт, как правило, представлял из себя отдельный физический сервер, на котором работал единственный экземпляр Apache. К началу двухтысячных стало очевидно, что модель с единственным физическим сервером не может быть эффективно реплицирована для удовлетворения нужд растущих веб-сервисов. Несмотря на то, что Apache является неплохой платформой для дальнейших разработок, изначально он был спроектирован для создания копии веб-сервера для каждого нового соединения, что в современных условиях не позволяет добиться необходимой масштабируемости.

В конечном счете вокруг Apache развилась мощная экосистема сторонних сервисов, что позволяет разработчикам получать практически любые инструменты для создания приложений. Но у всего есть цена, и в данном случае за большое количество инструментов для работы с единственным программным продуктом, необходимо расплачиваться меньшими возможностями масштабирования.

Традиционные основанные на работе с потоками или процессами модели обработки одновременных соединений подразумевают обработку каждого соединения с помощью отдельного процесса или потока и блокиро-

вание операций ввода/вывода. В зависимости от приложения такой подход может быть крайне неэффективным с точки зрения затрат ресурсов процессора и памяти. Создание отдельного процесса или потока требует подготовки новой среды запуска, включая выделение памяти стека и кучи, а также создания нового контекста выполнения. На все это тратится дополнительное процессорное время, что в итоге может приводить к проблемам с производительностью из-за избыточных переключений контекста. Все эти проблемы в полной мере проявляются при использовании веб-серверов старой архитектуры, таких как Apache.

Обзор архитектуры веб-сервера nginx

С самого начала своего существования **nginx** должен был играть роль специализированного инструмента, позволяющего достичь более высокой производительности и экономичности использования серверных ресурсов, одновременно позволяя осуществлять динамический рост веб-сайта. В итоге **nginx** получил асинхронную, модульную, событийно-ориентированную архитектуру.

Nginx активно использует мультиплексирование и нотификации событий, назначая конкретные задачи отдельным процессам. Соединения обрабатываются с помощью эффективного цикла выполнения с помощью определенного количества однопоточных процессов, называемых worker'ами. Внутри каждого **worker nginx** может обрабатывать многие тысячи одновременных соединений и запросов в секунду.

Структура кода

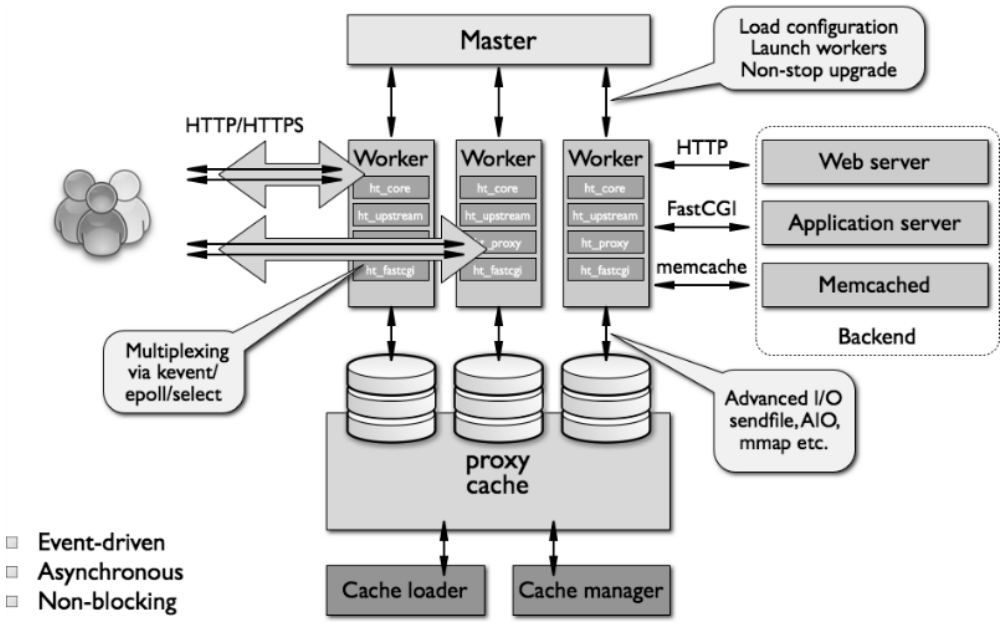
Worker в **nginx** включает ядро и функциональные модули. Ядро nginx отвечает за поддержание цикла выполнения и исполнения подходящих секций кода модулей на каждом шаге обработки процесса. Модули предоставляют большую часть функциональности уровня приложений. Также модули читают и пишут в сеть и хранилище, трансформируют контент, осуществляют исходящую фильтрацию и, в случае работы в режиме прокси, передают запросы вышестоящим серверам.

Модульная архитектура **nginx** позволяет разработчикам расширять набор функций веб-сервера без необходимости модификации кода его ядра. Существует несколько разновидностей модулей **nginx** — модули ядра, модули событий, фазовые обработчики, протоколы, фильтры, балансировщики нагрузки, обработчики переменных и т.п. При этом **nginx** не поддерживает динамически загружаемые модули, то есть они компилируются

вместе с ядром на стадии создания сборки. Разработчики планируют добавить функциональность загружаемых модулей в будущем.

Для организации различных действий, связанных с приемом, обработкой и управлением сетевыми соединениями и загрузкой контента, **nginx** использует механизмы нотификаций и несколько механизмов улучшения производительности дискового ввода/вывода в **ОС Linux**, **Solaris** и **BSD-системах** — среди них **kqueue**, **epoll** и **event ports**.

Высокоуровневое представление архитектуры nginx показано на рисунке ниже:



Модель работы worker-процессов

Как было отмечено выше, **nginx** не создает процесс или поток для каждого соединения. Вместо этого специальный **worker** обрабатывает прием новых запросов с общего «слушающего» сокета и запускает высокоэффективный цикл выполнения внутри каждого **worker**-процесса — это позволяет обрабатывать тысячи соединений для одного **worker'а**. Каких-то специальных механизмов распределения соединений между разными **worker**-процессами в **nginx** нет, эта работа выполняется в ядре **ОС**. В процессе загрузки создается набор слушающих сокетов, а затем worker постоянно принимает, считывает и пишет в сокеты в процессе обработки HTTP-запросов и ответов.

Самой сложной частью кода «воркеров» **nginx** является описание цикла выполнения. Он включает всевозможные внутренние вызовы и активно использует концепцию асинхронной обработки задач. Асинхронные операции реализованы посредством модульности, оповещений о событиях, а так-

же широкого использования колбэк-функций и доработанных таймеров. Главная цель всего этого — по максимуму уйти от использования блокировок. Единственным случаем, когда **nginx** может их применять, является ситуация недостаточной для работы **worker**-процесса производительности дискового хранилища.

Поскольку **nginx** не создает процессы и потоки для каждого соединения, в подавляющем большинстве случаев веб-сервер очень консервативно и крайне эффективно работает с памятью. Кроме того, он сохраняет циклы процессора, поскольку в случае **nginx** отсутствует паттерн постоянного создания и уничтожения процессов и потоков. **Nginx** проверяет состояние сети и хранилища, инициализирует новые соединения, добавляет их в цикл выполнения, а затем асинхронно обрабатывает до «победного конца», после чего соединение деактивируется и исключается из цикла. Благодаря этому механизму, а также вдумчивому использованию системных вызовов и качественной реализации поддерживающих интерфейсов вроде распределителей памяти (**pool** и **slab**), **nginx** позволяет добиться низкой или средней загрузки **CPU** даже в случае экстремальных нагрузок.

Использование нескольких **worker**-процессов для обработки соединений также делает веб-сервер хорошо масштабируемым для работы с несколькими ядрами. Эффективное использование многоядерных архитектур обеспечивается созданием одного **worker**-процесса для каждого ядра, а также позволяет избежать блокировок и трешинга потоков. Механизмы контроля ресурсов изолированы внутри однопоточных worker-процессов — такая модель также способствует более эффективному масштабированию физических устройств хранения, позволяет добиваться более высокой утилизации дисков и избегать блокирования дискового ввода/вывода. В итоге ресурсы сервера используются эффективнее, а нагрузка распределяется между несколькими worker-процессами.

Для разных паттернов загрузки процессора и диска число **worker**-процессов **nginx** может изменяться. Разработчики веб-сервера рекомендуют системным администраторам пробовать различные варианты конфигурации, чтобы получить наилучшие результаты в плане производительности. Если паттерн можно описать как «интенсивную загрузку **CPU**» — например, в случае обработки большого количества **TCP/IP**-соединений, осуществления компрессии или использовании **SSL**, то число «воркеров» должно совпадать с количеством ядер. Если же нагрузка в основном падает на дисковую систему — например, при необходимости загрузки и выгрузки из хранилища крупных объёмов контента — то число worker-процессов может быть в полтора-два раза больше количества ядер.

В следующих версиях веб-сервера разработчики **nginx** планируют решить проблему возникновения ситуаций блокировки дискового **I/O**. На момент написания этой главы в случае недостаточной производительности

хранилища при осуществлении дисковых операций конкретного **worker**-процесса, для него может быть заблокирована возможность чтения или записи. Чтобы свести такую вероятность к минимуму, можно использовать различные комбинации директив конфигурационных файлов и существующих механизмов — например, опции **sendfile** и **AIO** обычно позволяют серьезно повысить производительность хранилища.

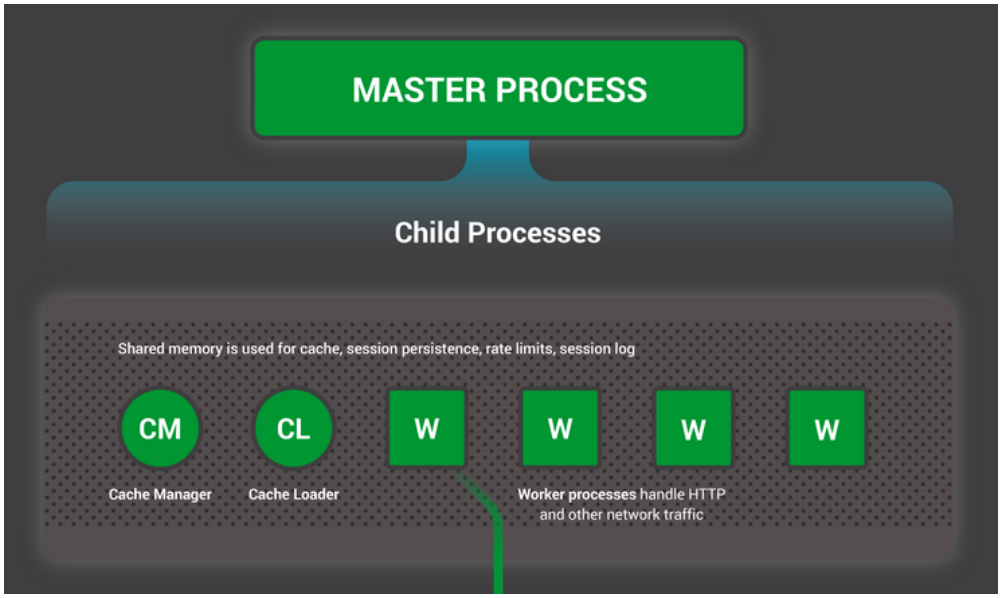
Еще одна проблема существующей модели worker-процессов связана с ограниченной поддержкой встроенных скриптов. В случае стандартной версии **nginx** доступно лишь встраивание **Perl**-скриптов. Такая ситуация объясняется просто — главной проблемой является вероятность того, что встроенный сценарий будет заблокирован в ходе выполнения операции или неожиданно завершится. В обоих случаях **worker**-процесс зависнет, что может затронуть тысячи соединений разом.

Роли процессов nginx

Nginx запускает несколько процессов в памяти — один **master**-процесс и несколько «**воркеров**». Также существует несколько служебных процессов — например, менеджер и загрузчик кэша. В версиях **nginx 1.x** все процессы однопоточные. Все они используют для взаимодействия друг с другом механизмы разделения памяти. Master-процесс запускается под пользователем **root**. Служебные и worker-процессы работают без привилегий суперпользователя.

Master-процесс отвечает за следующие задачи:

- чтение и валидация конфигурации;
- создание, связывание и закрытие сокетов;
- старт, прерывание и поддержка сконфигурированного количества worker-процессов;
- реконфигурация без прерывания работы сервиса;
- контроль постоянных двоичных обновлений (запуск новых «бинарников» и откат на предыдущую версию в случае необходимости);
- повторное открытие лог-файлов;
- компиляция встроенных Perl-скриптов.



Worker-процессы принимают и обрабатывают поступающие от клиентов соединения, предоставляют функциональность **reverse proxy** и фильтрации, а также делают почти все, что должен делать nginx. В общем случае, чтобы отследить текущее состояние веб-сервера, системному администратору нужно взглянуть на воркеры, поскольку именно они его [состояние] лучше всего отражают.

Процесс загрузчика кэша отвечает за проверку элементов, находящихся в кэше на диске, а также за обновление размещенной в памяти базы метаданными. Загрузчик готовит экземпляры nginx к работе с уже хранящимися на диске файлами. Он проходит по директориям, изучает метаданные контента в кэше, обновляет необходимые элементы в разделяемой памяти, а затем завершает работу.

Менеджер кэша главным образом отвечает за контроль актуальности кэша. При нормальном функционировании веб-сервера он находится в памяти, а в случае сбоя его перезапускает **master**-процесс.

Краткий обзор кэширования в nginx

В **nginx** кэширование реализовано в форме иерархического хранилища данных в файловой системе. Ключи кэша могут быть сконфигурированы, и контролировать, что попадает в него, можно с помощью различных параметров запросов. Ключи кэша и метаданные хранятся в сегментах разделяемой памяти, к которым есть доступ у воркеров, а также у загрузчика и менеджера кэша. В настоящий момент в **nginx** нет кэширования файлов во внутренней памяти, кроме тех возможностей оптимизации, которые доступны при работе с механизмами виртуальной файловой системы ОС. Каждый закэшированный ответ помещается в отдельный файл файловой

системы. Иерархия котролируется с помощью конфигурационных директив **nginx**. Когда ответ записывается в структуру директорий кэша, путь и имя файла извлекаются из **MD5**-хеша прокси-**URL**.

Процесс помещения контента в кэш проходит следующим образом: когда **nginx** считывает ответ с вышестоящего сервера, контент сначала записывается во временный файл вне структуры директорий кэша. Когда веб-сервер заканчивает обработку запроса, он меняет имя временного файла и перемещает его в директорию кэша. Если директория временных файлов размещается на другой файловой системе, то файл будет скопирован, поэтому рекомендуется размещать временную и кэш-директорию на одной файловой системе. Кроме того, с точки зрения безопасности хорошим решением в случае необходимости очистки файлов будет и их удаление из кэша, поскольку существуют сторонние расширения для nginx, которые могут предоставлять удаленный доступ к кэшированному контенту.

Конфигурация nginx

На создание конфигурационной системы **nginx** Игоря Сысоева вдохновил опыт работы с **Apache**. Разработчик считал, что для веб-сервера необходима масштабируемая конфигурационная система. И главная проблема масштабируемости возникала при необходимости поддержки большого количества сложных конфигураций с множеством виртуальных серверов, директорий и наборов данных. Поддержка и масштабирование относительно крупной веб-инфраструктуры может превратиться в настоящий ад.

В результате конфигурация **nginx** была спроектирована таким образом, чтобы упростить рутинные операции по поддержке веб-сервера и предоставить инструменты для дальнейшего расширения системы.

Конфигурация **nginx** хранится в нескольких текстовых файлах, которые обычно располагаются в директориях **/usr/local/etc/nginx** или **/etc/nginx**. Главный конфигурационный файл обычно называется **nginx.conf**. Чтобы сделать его более читабельным, части конфигурации можно разнести по разным файлам, которые затем включаются в главном. При этом важно заметить, что **nginx** не поддерживает файлы **.htaccess** — вся конфигурационная информация должна располагаться в централизованном наборе файлов.

Изначальное чтение и проверка конфигурационных файлов осуществляется **master**-процессом. Скомпилированная форма конфигурации для чтения доступна **worker**-процессам после их выделения из **master**-процесса. Конфигурационные структуры автоматически разделяются механизмами управления виртуальной памятью.

Существует несколько различных контекстов для блоков и директив

main, http, server, upstream, location (mail, для mail proxy). К примеру, нельзя поместить блок **location** в блок директив **main**. Также, чтобы не добавлять лишнюю сложность, в **nginx** нет конфигурации «глобального веб-сервера».

Как говорит сам Сысоев:

Локации, директории и другие блоки в конфигурации глобального веб-сервера — это то, что мне никогда не нравилось в **Apache**, поэтому они никогда не появлялись в **nginx**.

Синтаксис и форматирование конфигурации **nginx** следуют стандарту оформления кода **C ("C-style convention")**. Несмотря на то, что некоторые директивы **nginx** отражают определенные части конфигурации **Apache**, в целом настройка двух веб-серверов серьезно отличается. К примеру, в **nginx** поддерживаются правила перезаписи, а в случае Apache для этого администратор вручную должен будет адаптировать **legacy**-конфигурацию. Различается и реализация «движка» перезаписи.

Nginx также поддерживает несколько полезных оригинальных механизмов. К примеру — переменные и директива **try_files**. В **nginx** переменные используются для реализации мощного механизма контроля **run-time**-конфигурации веб-сервера. Они могут использоваться с различными конфигурационными директивами для обеспечения дополнительной гибкости в описании условий обработки запросов.

Директива **try_files** изначально создавалась в качестве замены условных операторов **if**, а также для быстрого и эффективного сопоставления разных **URL** и контента.

Внутреннее устройство nginx

Nginx состоит из ядра и целого ряда модулей. Ядро отвечает за создание основы веб-сервера, работу функциональности **web-** и **reverse**-прокси. Также оно отвечает за использование сетевых протоколов, построение среды запуска и обеспечение беспроблемного взаимодействия между разными модулями. Однако большая часть функций, связанных с протоколами и приложениями, реализуется с помощью модулей, а не ядра.

Соединения обрабатываются **nginx** с помощью трубы или цепи модулей. Другими словами, для каждой операции есть модуль, который выполняет нужную работу — например, компрессию, модификацию контента, выполнение серверных включений, взаимодействие с внешними серверами через **FastCGI** или **uwsgi**-протоколы, или общение с **memcahed**.

Существует пара модулей, которые размещаются между ядром и «функциональными» модулями — это **http** и **mail**-модули. Они обеспечивают дополнительный уровень абстракции между ядром и низкоуровневыми

компонентами. С их помощью реализована обработка последовательностей событий, связанных с определенным сетевым протоколом вроде **HTTP**, **SMTP** или **IMAP**. Вместе с ядром эти высокоуровневые модули отвечают за поддержание верного порядка вызовов соответствующих функциональных модулей. В настоящий момент **HTTP**-протокол реализован в качестве части **http**-модуля, однако в будущем разработчики планируют выделить его в отдельный функциональный модуль — это продиктовано необходимостью поддержки других протоколов (например, SPDY).

Большинство существующих модулей дополняют **HTTP**-функциональность **nginx**, но модули событий и протоколов также используются и для работы с почтой (mail). Модули событий предоставляют механизм оповещений о событиях для различных ОС — например, **kqueue** или **epoll**. Выбор модуля, используемого nginx, зависит от конфигурации сборки и возможностей операционной системы. Модули протоколов позволяют **nginx** работать через **HTTPS**, **TLS/SSL**, **SMTP**, **POP3** и **IMAP**.

Вот так выглядит типичный цикл обработки HTTP-запроса:

1. Клиент отправляет HTTP-запрос.
2. Ядро в соответствии со сконфигурированной локацией для запроса nginx выбирает нужный фазовый обработчик.
3. В случае включенной прокси-функциональности модуль балансировки нагрузки выбирает для целей проксирования вышестоящий сервер.
4. Фазовый обработчик заканчивает свою работу и передает буфер вывода первому фильтру.
5. Первый фильтр передает вывод второму фильтру.
6. Второй фильтр передает вывод третьему фильтру (и так далее).
7. Итоговый ответ пересылается клиенту.

Вызов модулей в nginx можно настраивать, он осуществляется с помощью колбэков с указателями на исполняемые функции. Минус здесь заключается в том, что если разработчик хочет написать собственный модуль, то ему нужно будет четко прописать, как и где он должен запускаться. К примеру, вот в каких точках это может происходить:

- До чтения и обработки конфигурационного файла.
- В момент завершения инициализации главной конфигурации.
- После инициализации сервера (хоста/порта).

- Когда серверная конфигурация сливается с основной.
- Когда стартует или завершается master-процесс.
- В момент старта или завершения нового worker-процесса.
- В момент обработки запроса.
- В процессе фильтрации заголовка и тела ответа.
- При выборе начальной и повторной инициализации запроса к вышестоящему серверу.
- В процессе обработки ответа от вышестоящего сервера.
- В момент завершения взаимодействия с этим сервером.

Внутри воркера последовательность действий, ведущая в цикл обработки, где генерируется ответ, выглядит следующим образом:

- Старт ngx_worker_process_cycle().
- События обрабатываются с помощью механизмов ОС (например, epoll или kqueue).
- События принимаются, отправляются соответствующие действия.
- Процесс/прокси запрашивает заголовок и тело.
- Контент ответа (заголовок, ответ) генерируется и отправляется клиенту.
- Запрос финализируется.
- Таймеры и события повторно инициализируются.

Более детализированное описание обработки HTTP-запроса можно представить так:

1. Инициализация обработки запроса.
2. Обработка заголовка.
3. Обработка тела.
4. Вызов соответствующего обработчика.
5. Прохождение фаз обработки.

В процессе обработки запрос проходит несколько фаз. На каждой из них вызываются соответствующие обработчики. Обычно они выполняют четыре задачи: получают конфигурацию местоположения, генерируют соответствующий ответ, отправляют заголовок, а затем тело. У обработчика есть один аргумент: определенная структура, описывающая запрос. В структуре запроса содержится большое количество полезной информации: например, метод запроса, URL и заголовок.

После прочтения заголовка HTTP-запроса, nginx просматривает связанную конфигурацию виртуального сервера. Если виртуальный сервер найден, то запрос проходит шесть фаз:

1. Фаза перезаписи сервера.
2. Фраза поиска местоположения (location).
3. Перезапись местоположения.
4. Фаза контроля доступа (access control).
5. Фаза работы try_files.
6. Фаза записи логов.

В процессе создания контента в ответ на запрос, nginx передает его различным обработчикам контента. Сначала запрос может попасть к так называемым безусловным обработчикам вроде perl, proxy_pass, flv, mp4. Если запрос не подходит ни к одному из этих обработчиков контента, то он по цепочке передается следующим обработчикам: random index, index, autoindex, gzip_static, static.

Если специализированный модуль вроде mp4 или autoindex не подходит, то контент рассматривается в качестве директории на диске (то есть, в качестве статического) и за него отвечает контент-обработчик static.

После этого контент передается фильтрам, которые работают по определенной схеме. Фильтр получает вызов, начинает работать, вызывает следующий фильтр и так до момента вызова последнего фильтра в цепочке. Существуют фильтры заголовков и тела. Работа фильтра заголовка состоит из трех основных шагов:

1. Определение необходимости действий в ответ на запрос.
2. Обработка запроса.
3. Вызов следующего фильтра.

Фильтры тела трансформируют сгенерированный контент. Среди их возможных действий:

- Серверные включения.
- Фильтрация XSLT.
- Фильтрация изображений (наример, ресайзинг картинок на лету).
- Модификация кодировки.
- Gzip-компрессия.
- Кодирование фрагментов (chunked encoding).

После прохождения цепочки фильтров ответ передается в модуль записи. Также существуют два специальных фильтра — copy и postpone. Первый из них отвечает за наполнение буферов памяти релевантным контентом ответов, а второй используется для подзапросов.

Подзапросы — это очень важный и очень мощный механизм для обработки запросов и ответов. С помощью подзапросов nginx может вернуть результат для разных URL, запрошенных клиентом. Некоторые вебфреймворки для решения этой задачи используют внутренние редиректы, однако nginx идет дальше — фильтры не только выполняют разные подзапросы и комбинируют их вывод в один общий ответ, но подзапросы также могут быть иерархичными и вложенными. То есть подзапрос может выполнять собственный подзапрос («под-подзапрос»), а тот, в свою очередь, может инициировать «под-под-подзапрос».

Подзапросы могут указывать на файлы на диске, другие обработчики или вышестоящие серверы. Они крайне полезны для вставки дополнительного контента при использовании данных из первоначального запроса. К примеру, SSI-модуль (server side include) использует фильтр для парсинга содержимого возвращенного документа, а затем заменяет директивы include контентом из указанных URL-адресов. Точно так же можно создать фильтр, который превращает все содержимое документа в URL, а затем добавляет к URL сам новый документ.

Также в nginx есть модули балансировки нагрузки и upstream-модули. Последние используются для подготовки контента к отправки вышестоящему серверу и получения ответов от него. В этом случае не происходит вызовов фильтров вывода. Upstream-модуль устанавливает колбэки, которые нужно вызвать, когда вышестоящий сервер будет готов к записи или чтению. Существуют колбэки для реализации следующей функциональности:

- Организация буфера запроса для отправки вышестоящему серверу.

- Повторная инициализация соединения с сервером (она происходит перед созданием запроса).
- Обработка первых битов ответа и сохранение указателей на данные, полученные с сервера.
- Прерывание запросов (происходит при неожиданном отключении клиента).
- Финализация запроса после того, как nginx закончит чтение с вышестоящего сервера.
- Обрезание тела ответа (удаление трейлера).

Модули балансировки нагрузки добавляются к обработчику proxy_pass для обеспечения возможности выбора вышестоящего сервера — в случае, если их более одного. Механизмы работы с вышестоящими серверами и балансировки нагрузки позволяют выявлять неисправные серверы и перенаправлять запросы к функционирующим узлам.

Также в nginx есть интересные модули, которые предоставляют дополнительный набор переменных для использования в конфигурационном файле. В nginx переменные главным образом создаются и обновляются в различных модулях, но есть и два модуля, которые целиком посвящены переменным: geo и map. Модуль geo используется для облегчения отслеживания клиентов по IP-адресам. Он может создавать случайные переменные, которые зависят от IP-адреса клиента. Второй модуль, map, позволяет создавать переменные из других переменных, что облегчает маппинг имен хостов и других runtime-переменных.

Механизмы распределения памяти в worker-процессах nginx были созданы с опорой на опыт Apache. Высокоуровневое описание работы с памятью в nginx звучит так: для каждого соединения необходимые буферы памяти динамически выделяются, линкуются и используются для хранения и изменения заголовка и тела запроса или ответа, а затем освобождаются при завершении соединения. Nginx пытается по-максимуму избегать копирования данных в памяти, большая часть из них обрабатывается с помощью переменных указателей без вызова memcpy.

Задача управления распределением памяти решается с помощью специального распределителя пула nginx. Зоны разделяемой памяти используются для приема мьютекс, метаданных кэша, кэша SSL-сессий и информации, связанной с управлением полосой пропускания (лимиты). Для управления распределением памяти в nginx реализован slab-распределитель. Безопасное использование разделяемой памяти осуществляется за счет механизмов блокировки (мьютексы и семафоры). Для организации сложных

структур данных в nginx используется реализация красно-черных деревьев. Они применяются для сохранения метаданных кэша в разделяемой памяти, отслеживания не-regex определения местоположений и для некоторых других задач.